

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DESPACHO ECONÔMICO  
COM SEGURANÇA DINÂMICA

TESE SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MANUEL FERNANDO ROMÁN ARÍSPE

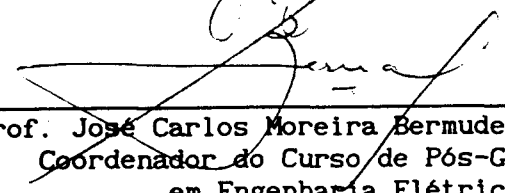
FLORIANÓPOLIS, SETEMBRO DE 1990

DESPACHO ECONÔMICO  
COM SEGURANÇA DINÂMICA

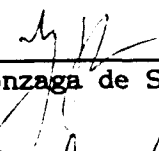
Manuel Fernando Román Arispe

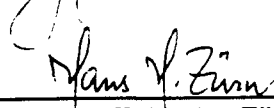
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA  
- ESPECIALIDADE ELÉTRICA E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE  
PÓS-GRADUAÇÃO.

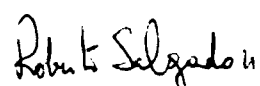
  
\_\_\_\_\_  
Prof. Luiz Gonzaga de Souza Fonseca, D.Sc.

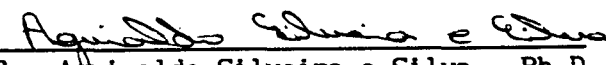
  
\_\_\_\_\_  
Prof. José Carlos Moreira Bermudez, Ph.D.  
Coordenador do Curso de Pós-Graduação  
em Engenharia Elétrica

APROVADA PERANTE A BANCA EXAMINADORA COMPOSTA DOS PROFESSORES

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Luiz Gonzaga de Souza Fonseca, D.Sc.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Hans Helmut Zürn, Ph.D.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Roberto de Souza Salgado, Ph.D.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Aginaldo Silveira e Silva, Ph.D.

A DEUS.

A Martinha,      minha querida esposa e  
companheira.

A minhas amadas filhas: Paola, Claudia Alexandra,  
Jazmin Sachiko e Brisa Fernanda.

v

## A G R A D E C I M E N T O S

Ao Professor Luiz Gonzaga de Souza Fonseca pela orientação e valiosas sugestões durante a realização deste trabalho.

A todos os professores, colegas e funcionarios do Centro Tecnológico que de uma ou outra forma, contribuíram para a realização deste trabalho, especialmente ao amigo Carlos Roberto Minussi.

A Claudionor e Valeria pela grande amizade demonstrada para comigo e minha família.

A meus sogros Alejandro e Alcira por toda a colaboração prestada para ter a minha família junto a mim.

Aos funcionários do Núcleo de Procesamento de Dados da UFSC pela sua cordial atenção e colaboração.

À CAPES e a Universidade Mayor de San Simon pelo apoio financeiro.

# INDICE

<u>CAPÍTULO 1</u>	INTRODUÇÃO	1
<u>CAPÍTULO 2</u>	DESPACHO ECONÔMICO	5
2.1	Introdução	5
2.1.1	Métodos de solução	5
2.2	Formulação do problema do despacho econômico	6
2.2.1	Função objetivo	7
2.2.2	Restrições de operação	7
2.2.3	Restrições de segurança	9
2.3	O modelo linearizado	9
2.3.1	Equação de balanço de potência	10
2.3.2	Trânsito ou fluxo de potência ativa nas linhas	13
2.3.3	Coeficientes da função objetivo linearizada	14
2.4	Conclusões	16
<u>CAPÍTULO 3</u>	ANÁLISE DE SEGURANÇA DINÂMICA	18
3.1	Introdução	18
3.2	Análise da estabilidade transitória	20
3.2.1	Modelo matemático do sistema de potência	20
3.3	Função de Liapunov tipo Energia	29
3.4	Método da Superfície Limite de Energia Potencial	35
3.5	Margem de Segurança	37
3.6	Conclusões	39

<b><u>CAPÍTULO 4</u></b>	<b>DESPACHO COM SEGURANÇA DINÂMICA</b>	<b>40</b>
4.1	Introdução	40
4.2	Melhoria de Segurança Dinâmica	40
4.2.1	Vetor $s$	41
4.3	Formulação do despacho econômico com segurança dinâmica	43
4.3.1	Função objetivo	44
4.4	Interpretação física	44
4.5	Modelo de otimização	46
4.6	Algoritmo principal	47
4.6.1	Algoritmo redespacho de geração	48
4.6.2	Alternativa no critério de parada	49
4.7	Conclusões	51
<b><u>CAPÍTULO 5</u></b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS</b>	<b>53</b>
5.1	Introdução	53
5.2	Casos estudados	53
5.3	Análise dos resultados	54
5.3.1	Exemplo 1: Despacho resultante da aplicação de critério estático	54
5.3.2	Exemplo 2: a) Despacho econômico puro	56
	b) Melhoria da segurança	57
	c) Despacho econômico com segurança dinâmica	58
5.3.3	Exemplo 3: Redespacho econômico-seguro	59
5.3.4	Exemplo 4: Consideração das perdas, despacho econômico e segurança dinâmica.	60
5.4	Critério de parada	61
5.5	Conclusões	62

<u>CAPÍTULO 6</u>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS</b>	64
6.1	Conclusões	64
6.2	Sugestões para futuros trabalhos	66
<u>CAPÍTULO 7</u>	<b>REFERÊNCIAS</b>	68
ANEXO A	<b>DADOS DO SISTEMA</b>	72
ANEXO B	<b>POLITOPO L</b>	81



## RESUMO

Neste trabalho, propõe-se uma metodologia para o despacho econômico com segurança em relação a estabilidade transitória.

O problema é descrito por equações não lineares e a proposta é desenvolvida utilizando-se técnicas de programação linear, de forma iterativa, considerando-se pequenos deslocamentos no vetor de geração e revendo-se a linearização a cada passo. Para isto são linearizadas a função objetivo e as restrições de operação em torno de uma solução inicialmente dada e, em seguida, em torno das soluções que vão sendo obtidas, procurando-se com isto levar em conta as características não-lineares do problema.

A estabilidade transitória é incluída formalmente no problema de otimização como parcela integrante da função objetivo, através da direção  $\vec{s}$  de melhoria da segurança obtida na análise realizada a cada passo.

A fim de ilustrar a aplicação do algoritmo apresentam-se exemplos.

## ABSTRACT

This work presents a methodology for the economic dispatch considering security assesment in regard to the transient stability problem.

The problem is described by non linear equations and the solution of the proposition is made by linear programming techniques, considering small variations on the generation vector and restating the linearization in each step. To attain this the objctive function and the operating constraints are linearized around an initial solution and around every solution thus obtained taking into account, in this way, the non linear characteristics of the problem.

Transient stability is included on the optimization problem through the objctive function using the direction for security improvement obtained form the step by step analysis.

Examples are presented as means to illustrate the aplication of the algorithm.

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

Os sistemas de energia elétrica (SEE) são planejados para satisfazer a demanda com segurança e economia. A operação segura de um SEE significa diminuir a probabilidade de dano de equipamentos ou colapso do sistema em manobras ou durante certos defeitos. A economia implica em operar o sistema com mínimo custo de geração. Em geral os requisitos de segurança e otimalidade são conflitantes, mas não se pode considerá-los em separado. Uma vez que os SEE atuais se caracterizam por sua complexidade e envergadura, é necessário contar com ferramentas computacionais que auxiliem na operação do sistema de maneira rápida e confiável.

O objetivo do despacho econômico (DE) de um SEE é determinar a distribuição de geração que minimize o custo total de geração, sem qualquer violação dos limites de capacidade dos equipamentos do sistema.

Considerando que o DE pode apresentar uma solução insegura frente à ocorrência de perturbações, a segurança deve ser levada em conta no problema, através da adição de outras restrições chamadas de segurança.

Os critérios de segurança citados na literatura [12,16,17] são normalmente formulados sob o ponto de vista estático, dando lugar a uma avaliação otimista do desempenho, quanto à segurança do sistema. Este critério é usado sem considerar a transição do estado normal do sistema ao estado pós-defeito tendo em vista a natureza não-linear dos sistemas de potência. Assim para garantir a transição deve-se utilizar metodologias que incorporem meios de se analisar a alcançabilidade de estados de equilíbrio a partir de condições correspondentes ao estado em que cessa uma perturbação [3,18-23,27,28].

O análise da estabilidade transitória pode ser efetuada, por exemplo, por : - Simulação passo a passo, que consiste na solução numérica das equações diferenciais que descrevem o comportamento do sistema . O diagnóstico da estabilidade é realizado a partir da análise do comportamento dos ângulos das máquinas em função do tempo. Além disto, o dispêndio computacional é elevado e não é possível saber quão estável/instável é o sistema associado à contingência em estudo.

- O método direto de Liapunov, tem como características relevantes a análise da estabilidade transitória sem que seja necessário resolver as equações diferenciais que representam o sistema. Por exemplo no caso do método da Superfície Limite de Energia Potencial (SLEP), que computacionalmente é rápido e permite fazer a análise de "n" contingências num único processamento. Além disto pode-se utilizar margens de segurança do sistema que indicam a "distância" que o sistema se encontra de sua condição de instabilidade.

O despacho econômico (DE) apareceu no princípio da década dos anos 20, quando os engenheiros se defrontaram com o problema da distribuição de geração entre diversas unidades disponíveis. Desde então vários métodos foram desenvolvidos [5], tais como:

- O critério de maior carregamento das unidades segundo a sua eficiência.
- O critério de igual custo incremental para todas as unidades , embora não sejam consideradas as perdas de transmissão.
- A inclusão das perdas de transmissão no despacho econômico junto com o critério de igual custo incremental [1,5].
- Incorporação no despacho econômico das restrições de fluxo de potência ativa nas linhas de transmissão [7,8].
- Como consequência do reconhecimento que a solução do problema do despacho econômico pode ser inseguro frente a perturbações (saída de linhas),

inclui-se a consideração da segurança no problema, definida a partir de uma análise de contingências [12,17].

- A consideração da segurança dinâmica (estabilidade transitória) na operação econômica dos SEE foi feita em [27], onde o despacho econômico é associado a uma análise e melhoria de segurança dinâmica. O DE é formulado como um problema de programação não linear, usando o método dos gradientes projetados para sua solução. Para a análise de estabilidade transitória é utilizado o segundo método de Liapunov e são calculados domínios de estabilidade e índices de segurança que indicam a situação do sistema frente a um conjunto de contingências. Através de limites inferiores definidos a partir da função energia, é proposto um procedimento para melhoria de segurança, através de um redespacho de geração, quando a solução do DE é insegura. A topologia de rede não é preservada, por quanto é reduzida às barras internas de geração.

Neste trabalho propõe-se uma metodologia para o despacho econômico considerando a segurança dinâmica e formulado como um problema de programação linear onde a função objetivo e restrições são linearizadas sucessivamente visando modelar da melhor forma as características não lineares do problema.

O conceito de Superfície Limite de Energia Potencial (SLEP) será utilizado para avaliar a estabilidade transitória [18,28] em virtude de suas vantagens em relação a outros métodos, como mostrado em [20].

No capítulo 2 é formulado o despacho econômico levando em conta as perdas de transmissão.

No capítulo 3 estuda-se a estabilidade transitória, especialmente o método da superfície limite de energia potencial e define-se margem de segurança do sistema.

No capítulo 4, propõe-se o modelo de programação linear iterativo para o despacho econômico com segurança dinâmica ou estabilidade

transitória.

No capítulo 5, apresentam-se os resultados do uso do algoritmo para sistemas exemplos.

No capítulo 6, são apresentadas conclusões sobre o trabalho e são dadas sugestões para futuros trabalhos.

O capítulo 7 contém as referências bibliográficas consultadas no decorrer do trabalho.

## CAPITULO 2

DESPACHO ECONÔMICO

## 2.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo, é analisado o problema do despacho econômico (DE) considerando os limites de capacidade dos equipamentos do sistema.

O despacho econômico é apresentado como um problema de otimização e descreve-se a função objetivo usada e as restrições. Comenta-se brevemente sobre os diversos métodos de otimização usados. Para o modelo linearizado utiliza-se solução via programação linear. Considerando-se as características não lineares do problema, usam-se linearizações sucessivas para resolver o problema da função custo não linear, levando em conta o efeito das perdas na rede.

## 2.1.1 - MÉTODOS DE SOLUÇÃO

O problema do DE pode ser resolvido através de métodos de otimização não-linear [5,7,11,12] e programação linear [6,8,9,14-17]. A escolha do método é definida pelo tipo da função objetivo e restrições do problema de otimização utilizadas. No DE, a função objetivo (Custo de geração) e as restrições representadas pela equação de balanço de potência e fluxo de potência nas linhas são tipicamente não lineares.

A programação linear requer que a função objetivo e restrições sejam lineares. Assim a modelagem do sistema será aproximada, mas em troca ganha-se grande velocidade na solução e se evitam as dificuldades na convergência [6,17]. A linearização segmentada pode ser aplicada para a função objetivo mas este método aumenta a dimensão da programação linear

[6,17].

Neste trabalho utiliza-se programação linear em razão das vantagens que apresenta, e, visando uma modelagem mais exata do problema, serão admitidas várias linearizações sucessivas do DE em torno de cada ponto de operação obtido, a partir de um caso base.

## 2.2 - FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DO DESPACHO ECONÔMICO

A solução do problema do despacho econômico (DE) pode ser obtida como solução de um problema de otimização onde se minimiza uma função objetivo que reflete o custo de geração, sujeita a restrições de operação e segurança.

As funções do modelo de otimização serão escritas em função da variável de controle PG e possuem a forma geral:

$$\begin{array}{ll}
 \min & F(PG) \\
 \text{s.a.} & \\
 & \underline{h}(PG) = \underline{0} \\
 & \underline{g}(PG) \leq \underline{0} \\
 & \underline{s}(PG) \leq \underline{0}
 \end{array} \quad (2.2.1)$$

onde :

$\underline{PG}$  = Vetor de potências de geração ativa das unidades.

$F(PG)$  = Função escalar custo total de geração.

$\underline{h}, \underline{g}(PG)$  = Funções vetoriais correspondentes às restrições de operação.

$\underline{s}(PG)$  = Função vetorial correspondente às restrições de segurança.

A seguir serão descritas cada uma das funções que participam na



solução de despacho econômico.

### 2.2.1 - FUNÇÃO OBJETIVO

O custo total de geração é tomado como sendo a soma dos custos de geração das unidades do sistema.

As curvas de custo de produção das unidades termoeletricas geralmente usadas são quadráticas [6,9], e têm como expressão matemática:

$$F(PG) = \sum_{i=1}^{Ng} (c_i \cdot PG_i^2 + b_i \cdot PG_i + a_i) \quad (2.2.2)$$

onde:  $a_i$ ,  $b_i$  e  $c_i$  são os coeficientes da função custo de geração da  $i$ -ésima unidade e  $Ng$  é o número de unidades de geração.

### 2.2.2 - RESTRIÇÕES DE OPERAÇÃO [2]

Um sistema de energia elétrica está em operação normal, quando satisfaz a demanda e os limites de operação de cada componente do sistema são respeitados.

As principais restrições que aparecem são :

#### a) Balanco de potência

A equação de balanço de potência ativa, descreve o desempenho do sistema em regime permanente. Tem características não lineares e pode ser expressa como

$$\sum_{i \in Ng} PG_i = \sum_{i \in No} PC_i + P_L \quad (2.2.3)$$

onde:

$PC_i$  = Demanda de carga na barra  $i$ .

$P_L$  = Perdas totais de transmissão.

$N_c$  = Número de barras de carga.

$N_g$  = Número de barras de geração

#### b) Limites de Geração das Unidades

Estes limites correspondem às limitações físicas dos geradores, e são dados por :

$$PG^{\min} \leq PG \leq PG^{\max} \quad (2.2.4)$$

#### c) Restrições de fluxo nas linhas de transmissão

Representam os limites entre os quais devem estar os valores de fluxo de potência ativa nas linhas e transformadores em situação normal e são dados por :

$$T^{\min} \leq T \leq T^{\max} \quad (2.2.5)$$

onde:  $T = H \times (PG - PC) \quad (2.2.6)$

$T$  = Vetor dos fluxos de potência ativa nos ramos da rede.

$T^{\max}$  = Vetor de limites máximos de trânsito de potência ativa nas linhas de transmissão.

$T^{\min}$  = Vetor de limites mínimos de trânsito de potência ativa nas linhas de transmissão.

$H$  = Matriz que relaciona as injeções de potência ativa com os fluxos nas linhas.  $(N_L \times (N_B - 1))$

$N_L$  = Número de linhas de transmissão.

$N_B$  = Número de barras.

Os valores máximos de fluxo nas linhas são fixados , em geral , em função do limite térmico dos condutores , quedas de tensão máxima admitida ou por máxima flecha. No caso de vários limites prevalece o menor deles.

### 2.2.3 - RESTRIÇÕES DE SEGURANÇA ESTÁTICAS [2]

São as restrições de fluxo nos ramos da rede, válidas durante uma análise de contingências, representadas pela perda de equipamentos do sistema. Assim a restrição de trânsito de potência para a  $l$ -ésima contingência [12,17] é dada por:

$$T^{\min l} (PG) \leq T^l (PG) \leq T^{\max l} (PG) \quad (2.2.7)$$

onde :  $T^l(PG)$  é o vetor de fluxo nas linhas em função da ocorrência da contingência  $l$  ,  $l \in N_c$  , conjunto de índices das contingências consideradas.

### 2.3 - O MODELO LINEARIZADO

O problema do Despacho Econômico será colocado como um problema de Programação Linear, embora o problema seja não linear . Isto tem como objetivo facilitar a solução do problema embora a precisão neste caso seja prejudicada.

Para melhorar a precisão dos resultados utiliza-se neste trabalho linearização sucessiva do DE usando-se o desenvolvimento em serie de Taylor de primeira ordem.

Então o modelo linearizado para uma iteração  $k$  é o seguinte

[17] :

$$\min F(PG) = F(PG^k) + \left. \frac{\partial F}{\partial PG} \right|_{PG^k} (PG - PG^k) \quad (2.3.1.a)$$

s.a.

$$h(PG) \cong h(PG^k) + \left. \frac{\partial h}{\partial PG} \right|_{PG^k} (PG - PG^k) \quad (2.3.1.b)$$

$$| H \times (PG - PG^k) | \leq T^{\max} \quad (2.3.1.c)$$

$$PG^{\min} \leq PG \leq PG^{\max} \quad (2.3.1.d)$$

$$| PG - PG^0 | \leq \Delta \quad (2.3.1.e)$$

onde as expressões (2.3.1.a) a (2.3.1.c) são a função objetivo, a equação de balanço de potência e a equação de fluxo nas linhas linearizadas. As expressões (2.3.1.d) e (2.3.1.e) são os limites de geração das máquinas e o intervalo de acréscimo de geração permitida na  $k$ -ésima iteração respectivamente.

As restrições de segurança estática não foram incluídas na formulação acima, visando o objetivo do trabalho que é considerar a estabilidade transitória, como será proposto no capítulo 4.

As expressões linearizadas são obtidas conforme mostrado adiante.

### 2.3.1 - EQUAÇÃO DE BALANÇO DE POTÊNCIA

Usando-se a equação de balanço de potência

$$\sum_{i \in N_g} Pg_i = \sum_{i \in N_c} PC_i + P_L(PG) \quad (2.3.2)$$

diferenciando-se ambos os membros em relação a  $PG_i$ , e tomando-se as variações

de despacho em torno de um vetor  $PG^k$ , tem-se

$$\sum_{i \in N_g} \Delta PG_i = \sum_{i \in N_g} \frac{\partial PL}{\partial PG_i} \cdot \Delta PG_i \quad (2.3.3)$$

onde,  $\Delta PG_i = PG_i - PG_i^k$ . Reordenando chega-se a :

$$\sum_{i \in N_g} \left( 1 - \frac{\partial PL}{\partial PG_i} \bigg|_{PG^k} \right) \cdot (PG_i - PG_i^k) = 0 \quad (2.3.4)$$

onde denomina-se :

$PL$  = Perdas totais de potência ativa nas linhas de transmissão.

$\frac{\partial PL}{\partial PG_i}$  = Perdas ativas de transmissão correspondente a i-ésima barra de geração.

Neste trabalho calculam-se as perdas incrementais de transmissão através da fórmula de Dopazo (chamada também fórmula de coeficientes-B "on-line") conforme feito em [1,12,17,33]. Nesta formulação não é preciso explicitar uma barra de folga para o problema. As vantagens desta escolha serão exploradas na definição da função objetivo de segurança a ser feita no capítulo 4.

Considerando-se que as perdas ativas ( $PL$ ) e reativas ( $QL$ ) da rede são iguais á soma das injeções de potência complexa de barra, tem-se

$$P_L + jQ_L = J^T Z J^* \quad (2.3.5)$$

onde definimos a corrente da i-ésima barra

$$J_i = (P_i - jQ_i)/V_i e^{-j\theta_i}, \quad i \in N_b \quad (2.3.6)$$

sendo :  $P_i$  e  $Q_i$  as potências de injeção ativa e reativa nas barras.  
 $V_i$  e  $\theta_i$  são o módulo e ângulo das tensões de barra.

Expandindo (2.3.5) , usando (2.3.6) e separando a parte real obtém-se,

$$P_L = \sum_{j \in NB} \sum_{k \in NB} [D_{jk} (P_i P_k + Q_j Q_k) + C_{jk} (Q_j P_k - P_j Q_k)] \quad (2.3.7)$$

onde:

$$D_{jk} = R_{jk} \cos(\theta_j - \theta_k) / V_j V_k \quad (2.3.8)$$

$$C_{jk} = R_{jk} \sin(\theta_j - \theta_k) / V_j V_k \quad (2.3.9)$$

$R_{jk}$  = Parte real da matriz Z-barra.

A derivada parcial da equação (2.3.7) em relação a  $PG_i$  permite calcular a sensibilidade das perdas de transmissão com respeito a potência ativa gerada na barra  $i$ . Considerando-se:

$$D_{jk} = D_{kj}$$

$$C_{jk} = -C_{kj}$$

tem-se, então :

$$\frac{\partial P_L}{\partial PG_i} = 2 \sum_{k \in NB} (P_i D_{ik} - Q_k C_{ik}) \quad , \quad i \in Ng \quad (2.3.10)$$

que é uma expressão linear, função das potências de injeção ativa e reativa, o módulo das tensões e a abertura angular entre barras. Deve ser calculada para cada iteração.

### 2.3.2 - TRÂNSITO OU FLUXO DE POTÊNCIA ATIVA NAS LINHAS

As restrições de fluxo nas linhas podem ser expressas usando-se relações de fluxo de carga linearizado.

A expressão que relaciona as injeções de potência ativa nas barras com a abertura angular das mesmas é [6,29]

$$\theta = B^{-1} (PG - PC) \quad (2.3.11)$$

onde :  $B^{-1}$  = É a inversa da matriz susceptância de barra  $(NB-1) \times (NB-1)$ .

$\theta$  = Vetor de ângulos de fase das tensões nas barras  $(NB-1) \times 1$ .

A abertura angular entre as barras, como função dos ângulos nas barras, pode ser escrita

$$\psi = A \theta \quad (2.3.12)$$

onde :  $\psi$  = Vetor de abertura angular entre barras .  $(NL \times 1)$ .

$A$  = Matriz de incidência dos ramos nos nós.  $NL \times (NB-1)$ .

O fluxo nas linhas em função da abertura angular entre barras pode então ser obtido de :

$$T = BL \psi \quad (2.3.13)$$

onde :  $T$  é o vetor de fluxo de potência ativa nos ramos do sistema.

$BL$  é a matriz susceptância de linha diagonal  $(NL \times NL)$ .

Substituindo-se as expresões (2.3.11) e (2.3.12) em (2.3.13) tem-se :

$$T = BL A B^{-1} (PG - PC) \quad (2.3.14)$$

Definindo-se

$$H = B L A B^{-1} \quad (2.3.15)$$

a equação do fluxo nas linhas

$$T = H \times (PG - PC) \quad (2.3.16)$$

### 2.3.3 - COEFICIENTES DA FUNÇÃO OBJETIVO LINEARIZADA

A função objetivo  $F(PG)$  não linear, expressada por (2.2.2), pode ser linearizada em torno de um ponto de operação como é mostrado na figura 2.3.1; calculando a sua primeira derivada em relação a  $PG_1$  obtém-se o custo incremental de produção de cada unidade.

$$\frac{df_1}{dPG_1} = 2 c_1 \times PG_1 + b_1 \quad (2.3.17)$$

Deve-se salientar que as gerações não são independentes umas de outras e que a relação funcional entre elas está implícita na equação de balanço de potência ativa.

Assim, o custo incremental para cada nível de operação pode ser aproximado por valores constantes em torno de cada ponto de operação, como mostrado na figura 2.3.2.

Os custos incrementais são considerados válidos para pequenas variações em torno do ponto de operação em estudo. Isto é, se o ponto de operação muda do ponto "0" para o ponto "1", como mostra a figura 2.3.2, a solução obtida não é válida [9]. Estes custos incrementais são calculados para cada iteração, visando uma maior aproximação à característica não linear da função custo.



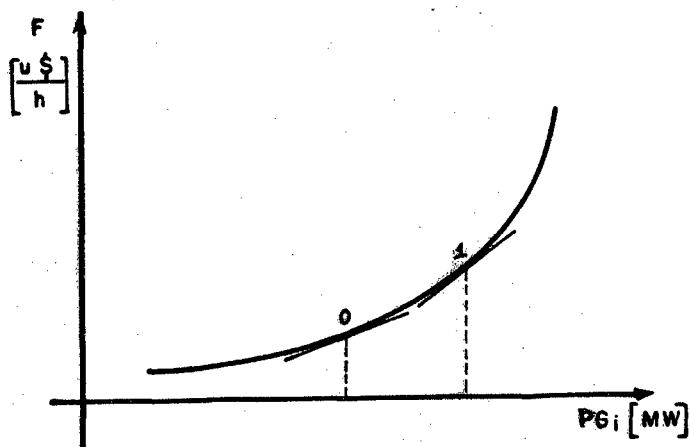


Figura 3.2.1 Custo de produção da i-ésima unidade.

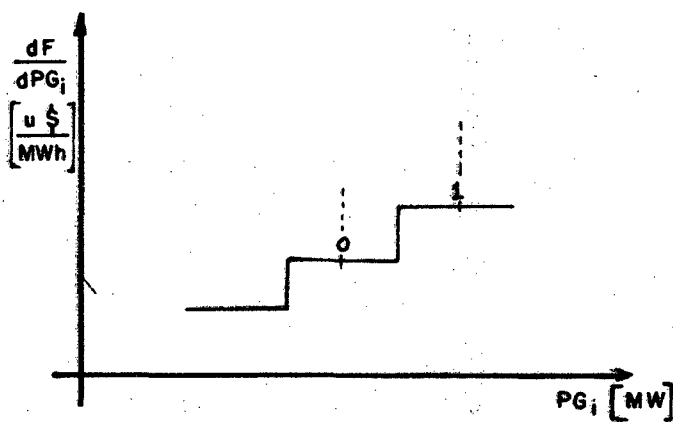


Figura 2.3.2 Custo incremental da i-ésima unidade

Para o caso de unidades hidráulicas, custos equivalentes são calculados, permitindo que sejam tratadas como unidades térmicas fictícias [29,30]. A seguir são apresentadas algumas considerações sobre o custo das unidades hidráulicas.

### Unidades hidráulicas [14,29]

Deve-se, notar que os custos equivalentes calculados para as unidades hidroelétricas são de obtenção mais elaborada do que os custos das unidades térmicas, porque estão associados ao valor da água, o qual é exatamente aquele valor que substituirá a geração térmica, hora por hora.

No planejamento da operação a longo prazo (2 a 5 anos), determina-se a proporção total de geração térmica e hidráulica de um sistema.

O cálculo dos custos de operação associados a utilização das unidades hidroelétricas começa a ser delineado a partir do planejamento anual (médio prazo) da operação, que trata de determinar com ênfase na segurança de suprimento, as energias disponíveis para a geração hidráulica. Estes custos são calculados com maior aproximação, através do pré-despacho de geração, onde as informações sobre aflúências de reservatórios, as demandas e as disponibilidades de energia hidroelétrica e dos grupos de geração estão mais atualizados. O pré-despacho estabelece o plano de geração horária para cada unidade de produção levando em conta as restrições operacionais.

Os custos de produção das unidades térmicas são também consideradas no planejamento anual da operação.

#### 2.4. - CONCLUSÕES

Neste capítulo foi estudado o problema do despacho econômico levando em conta as restrições de limite de capacidade dos geradores, linhas de transmissão e transformadores do sistema, além de considerar as perdas de transmissão no problema. As perdas incrementais de transmissão foram calculadas sem precisar definir uma barra de folga para o sistema, o que permite dar uma interpretação física da participação de cada unidade nas perdas de transmissão do sistema.

A função objetivo e restrições foram linearizadas para sua solução por um algoritmo de programação linear que funcionará de maneira iterativa, conforme mencionado.

A solução do problema do despacho econômico fornece uma solução que deve ser analisada do ponto de vista de estabilidade transitória, considerando-se a forte possibilidade de ocorrência de grandes perturbações no sistema. Assim, no próximo capítulo, estuda-se a segurança do sistema sob o ponto de vista da estabilidade transitória.

## CAPITULO 3

ANÁLISE DA SEGURANÇA DINÂMICA

## 3.1 - INTRODUÇÃO

A Análise de Segurança tem por objetivo determinar se, após a ocorrência de uma ou várias contingências de um conjunto pré-definido, existirá um novo ponto de operação no qual o sistema continuará operando.

A Análise de Segurança Estática verifica se existe violação nos limites dos equipamentos, fluxos de potência que possam provocar perda da Estabilidade Estática e/ou tensões anormais de barra, se a simulação incorpora o problema de reativos.

A Análise de Segurança Dinâmica ou de Estabilidade Transitória verifica se o ponto de operação pós-contingência é estável, ou seja, se não existe perda de sincronismo de alguma(s) máquina(s) do sistema.

É importante ressaltar que os critérios de Segurança Estática [6,8,17] fornecem uma avaliação de desempenho do sistema, sem considerar a transição do estado normal ao estado pós-defeito.

Para a análise da Estabilidade Transitória precisa-se resolver um conjunto de equações diferenciais não-lineares que modelam o sistema de potência. Em virtude das dificuldades apresentadas pelos métodos de solução analítica utilizam-se normalmente técnicas de solução numérica.

O tempo computacional exigido nos métodos de solução numérica e a necessidade de se analisar visualmente as curvas obtidas, dificultam e tornam onerosa a sua utilização no planejamento a médio prazo e é praticamente inviável no planejamento a longo prazo, face ao grande número de alternativas

normalmente presentes no planejamento de redes elétricas.

No planejamento da operação, apesar de ter melhor definida a configuração do sistema, tem-se disponível um curto tempo para fazer uma análise detalhada e identificar todas as contingências que possam trazer problemas na operação do sistema.

É necessário então contar com procedimentos que de maneira rápida e confiável auxiliem os engenheiros de planejamento e operação dos sistemas de energia. Nesta expectativa o Segundo Método de Liapunov apresenta-se como uma boa alternativa. Neste sentido destacam-se particularmente duas metodologias considerando resultados até agora apresentados em sistemas reais: O método do Politopo e o método da Superfície Limite de Energia Potencial (SLEP).

O método do Politopo [23,26,34] modela o sistema na sua forma reduzida às barras internas de geração, as condutâncias equivalentes de transferência entre geradores não são consideradas, e determina-se o domínio de estabilidade como sendo a maior superfície de nível tangente e inteiramente contida num Politopo definido para a configuração do sistema pós- defeito, onde a função energia potencial é radialmente crescente. No entanto os resultados obtidos fornecem tempos críticos com valores conservativos do ponto de vista prático [19,28], embora estas noções sejam úteis na obtenção de direções para melhoria da segurança [22].

O método da Superfície Limite de Energia Potencial (SLEP), [28] preserva a topologia da rede, não precisando reduzir o sistema às barras internas de geração, os resultados (tempos críticos) são rapidamente calculados e são compatíveis se comparados aos obtidos pelos métodos de simulação numérica (por exemplo o programa TRANSDIR).

No próximo item apresenta-se a fundamentação teórica da

análise da estabilidade transitória pelo método SLEP.

### 3.2 - ANÁLISE DA ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

#### 3.2.1 - MODELO MATEMÁTICO DO SISTEMA DE POTÊNCIA

A modelagem matemática do estudo da estabilidade transitória é determinado a partir das hipóteses adotadas normalmente [3,28] em sistemas de potência utilizando modelos simplificados :

- Supõe-se que a rede esta em regime permanente. Isto implica que as constantes de tempo da rede de transmissão são desprezíveis comparadas as constantes de tempo associadas às oscilações eletromecânicas.

- A máquina síncrona é representada por uma fonte de tensão constante em série com sua reatância transitória de eixo direto  $x'_d$ . Isto implica admitir constante o enlace de fluxo no campo durante o transitório.

- O ângulo de fase atrás da reatância transitória coincide com o ângulo do rotor.

- A potência mecânica de entrada  $P_{mi}$  é suposta constante durante o transitório, e igual ao valor pré-defeito. Isto é, supõe-se os reguladores de velocidade com constantes de tempo grandes em relação ao intervalo de tempo de interesse, que é da ordem de 1 a 2 segundos.

- O momento angular da máquina síncrona (constante de inércia) é considerado constante uma vez que os escorregamentos são pequenos.

- As potências de amortecimento, devido a atrito mecânico, enrolamentos amortecedores e variação da carga com o escorregamento, são considerados proporcionais ao desvio de frequência.

- As potências de amortecimento assíncrono, entre máquinas, são

desprezadas.

As cargas são representadas por modelos de impedância constante.

#### a) EQUAÇÃO DE OSCILAÇÃO

Considere-se a unidade geradora "i" de um sistema de "n" unidades. O gerador recebe por meio do eixo da turbina a "entrada" mecânica, ou potência da turbina,  $P_{m_i}$ . Ele fornece a saída elétrica ou potência do gerador  $P_{g_i}$  à rede.

Matematicamente a equação que descreve o movimento do i-ésimo rotor é:

$$M_i \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} = P_{m_i} - P_{g_i} \quad i \in \{Ng\} \quad (3.2.1)$$

sendo:

$$M_i = H_i / \pi f_0$$

$H_i$  = Constante de inércia da máquina i.

$f_0$  = frequência nominal da rede.

$\delta_i$  = ângulo do rotor medido com respeito a um eixo de referência que gira à velocidade síncrona.

$P_{m_i}$  = potência mecânica de entrada da máquina i.

$P_{g_i}$  = potência elétrica de saída da máquina i.

$Ng$  = número de máquinas.

Expressando a equação (3.2.1) como um conjunto de equações diferenciais de primeira ordem obtém-se

$$\dot{\delta}_1 = \omega_1 \quad (3.2.2)$$

$$\dot{\omega}_1 = -\frac{d_1}{M_1} \cdot \omega_1 + \frac{1}{M_1} \cdot (P_{m_1} - P_{g_1})$$

#### b) REFERÊNCIA CENTRO DE ÂNGULO

Sendo que o "sincronismo" é essencialmente um fenómeno físico associado a um movimento relativo entre máquinas síncronas, tem sido mostrado [3,19,28] que é conveniente adotar-se algum tipo de referência diferente da referência que gira com velocidade síncrona. Neste sentido usualmente são consideradas duas possibilidades: tomar o ângulo de um gerador como referência e medir os ângulos dos outros geradores em relação a este gerador [3] ou definir um centro de ângulo como referência (COA), variável no tempo e medir em relação a este os ângulos de todos os geradores (a formulação é análoga ao princípio de centro de massas em sistemas mecânicos). Esta última formulação é particularmente conveniente para a obtenção da função energia a ser empregada como função de Liapunov [3,18-23].

Assim o centro de ângulo é definido por

$$\delta_o = \frac{1}{M_T} \cdot \sum_{i \in N_g} M_i \delta_i \quad (3.2.3)$$

onde

$$M_T = \sum_{i \in N_g} M_i \quad (3.2.4)$$

Os ângulos e desvios de velocidade dos geradores em relação à referência centro de ângulo são dados por



$$\begin{aligned}\theta_1 &= \delta_1 - \delta_0 \\ \dot{\theta}_1 &= \dot{w}_1 = \dot{\alpha}_1 - \dot{w}_0\end{aligned}\quad (3.3.5)$$

onde  $\dot{w}_0 = \dot{\delta}_0$

A equação diferencial que descreve o movimento do centro de ângulos, considerando amortecimento nulo, é

$$M_T \ddot{\delta}_0 = \sum_{i \in N_g} (P_{m_i} - P_{g_i}) \quad (3.2.6)$$

Define-se então [3,19,28]:

Potência acelerante do centro de ângulo (PCA) como sendo:

$$PCA \triangleq \sum_{i \in N_g} (P_{m_i} - P_{g_i}) \quad (3.2.7)$$

Ao final do período transitório o sistema alcança um novo estado em regime permanente, e a potência acelerante do centro de ângulo é nula ( PCA = 0 ).

A equação de oscilação (3.2.2) com referência centro de ângulo pode ser escrita usando-se as variáveis  $\theta$  na forma:

$$\begin{aligned}\theta_1 &= w_1 \\ \ddot{w}_1 &= \frac{1}{M_1} (P_{m_1} - P_{g_1}) - \frac{1}{M_T} PCA, \quad i \in \{N_g\}\end{aligned}\quad (3.2.8)$$

Propriedades Centro de Ângulo [3,19,28]

1) As variáveis  $\delta_i$ , satisfazem à propriedade:

$$\sum_{i \in N_g} M_i \theta_i = 0 \quad i \in \{N_g\} \quad (3.2.9)$$

isto porque:

$$\begin{aligned} \sum_{i \in N_g} M_i \theta_i &= \sum_{i \in N_g} M_i (\delta_i - \delta_o) \\ &= \sum_{i \in N_g} M_i \delta_i - \delta_o \sum_{i \in N_g} M_i \\ &= \sum_{i \in N_g} M_i \delta_i - \frac{1}{M_T} \left( \sum_{i \in N_g} M_i \delta_i \right) \cdot M_T \\ &= 0 \end{aligned}$$

2) De forma semelhante

$$\sum_{i \in N_g} M_i \dot{\theta}_i = 0 \quad (3.2.10)$$

A prova é similar, bastando apenas substituir  $\delta$  por  $\dot{\delta}$  na equação acima.

c) MODELAGEM DA REDE

A modelagem será feita preservando-se a topologia da rede, isto é, sem redução às barras internas de geração [28].

Na figura (3.2.1) é mostrada a representação da i-ésima barra de geração do sistema de potência, onde as variáveis angulares estão referidas ao centro de ângulo.

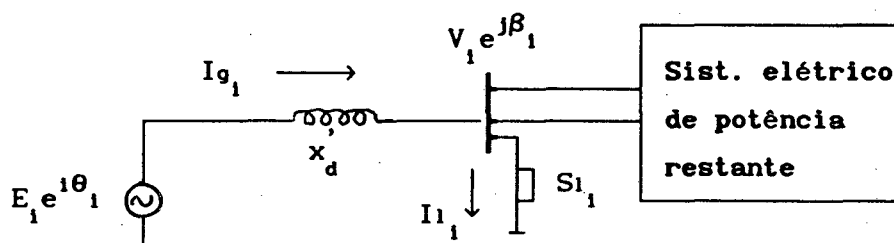


Figura 3.2.1 Representação da i-ésima barra do sistema de potência.

onde:

$V_1 e^{j\beta_1} = e_1 + f_1$  = Tensão na i-ésima barra externa de geração.

$E_1 e^{j\theta_1}$  = Tensão atrás da reatância transitória do i-ésimo gerador.

$I_{g_1}$  = Injeção de corrente do i-ésimo gerador.

$I_{l_1}$  = Corrente fornecida à carga conectada à i-ésima barra.

$S_{l_1} = P_{l_1} + jQ_{l_1}$  = Carga resultante na i-ésima barra.

A corrente injetada pelo i-ésimo gerador em função das tensões interna e externa de geração, para  $i = 1, 2, \dots, Ng$

$$I_{g_1} = B_1 e^{-j\pi/2} (E_1 e^{j\theta_1} - V_1 e^{j\beta_1}) \quad (3.2.11)$$

onde:

$$B_1 = 1/x'_{d_1} \quad (3.2.12)$$

$$I_{g_1} = B_1 (E_1 \sin\theta_1 - f_1) - jB_1 (e_1 \cos\theta_1 - e_1)$$

$$I_{g_1} = B_1 E_1 (\sin\theta_1 - j\cos\theta_1) + jB_1 (e_1 + jf_1) \quad (3.2.13)$$

Considerando as cargas modeladas por impedâncias constantes, as correntes elétricas pela carga podem ser calculadas pela seguinte expressão

$$I_{1_i} = \left( \frac{P_{1_i}^0 - j Q_{1_i}^0}{e_{o_i}^2 + f_{o_i}^2} \right) \cdot (e_i + j f_i) \quad , i=1,2,\dots,NB \quad (3.2.14)$$

onde: NB é número de barras do sistema elétrico.

"o" indica o valor da variável correspondente ao estado de equilíbrio antes do defeito.

### Equação matricial da rede

A equação matricial da rede é dada por

$$I_{barra}^1 = I_g - I_l = Y_{barra}^1 \cdot V_{barra} \quad (3.2.15)$$

onde:  $Y_{barra}^1$  é a matriz de admitância de barra usada no cálculo do fluxo de carga do estado de equilíbrio antes do defeito.

Substituindo (3.2.13) e (3.2.14) em (3.2.15) pode-se escrever matricialmente

$$I_{barra} = ( Y_{barra}^1 - jYB - YL ) V_{barra} \quad (3.2.16)$$

onde:

$$Y_{barra} = Y_{barra}^1 - jYB - YL$$

Logo:

$$I_{barra} = Y_{barra} V_{barra} \quad (3.2.17)$$

Das expressões (3.2.13), (3.2.14) e (3.2.16) pode ser escrito

$$I_{\text{barra}_i} = \begin{cases} E_i B_i [\text{sen } \theta_i - j \cos \theta_i] \\ 0 \end{cases}, \quad i = Ng+1, \dots, NB \quad (3.2.18)$$

A matriz YB é formada pelos inversos das reatâncias transitórias de cada gerador, segundo a lei de formação:

$$YB = \begin{cases} YB_{ii} = \frac{1}{x'_{d_i}} & ; \quad \text{para } i = 1, \dots, Ng \\ YB_{ii} = 0 & ; \quad \text{para } i = Ng+1, \dots, NB \\ YB_{ij} = 0 & ; \quad \text{para } i \neq j \end{cases} \quad (3.2.19)$$

A matriz YL é formada pelas impedâncias constantes resultantes da modelagem das cargas, segundo a lei de formação

$$YL = \begin{cases} YL_{ii} = \frac{PL_i^o - jQL_i^o}{e_o^2 + f_o^2} & ; \quad \text{para } i \in \{NB\} \\ YL_{ij} = 0 & ; \quad \text{para } i \neq j \in \{NB\} \end{cases} \quad (3.2.20)$$

#### Cálculo de $e_i$ , $f_i$

Para obter as tensões nas barras externas de geração que variam durante o transitorio, deve-se resolver a equação (3.2.17), que pode ser feito por inversão da matriz admitância de barra, ou seja,

$$V_{\text{barra}} = (Y_{\text{barra}})^{-1} \cdot I_{\text{barra}}$$

ou

$$\begin{bmatrix} V_g \\ \dots \\ V_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{gg} & Z_{gl} \\ \dots & \dots \\ Z_{lg} & Z_{ll} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_g \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.2.21)$$

onde:

$$V_{g_i} = e_i + j f_i, \quad i = 1, 2, \dots, N_g$$

$$V_{l_i} = e_i + j f_i, \quad i = N_g + 1, \dots, N_B$$

$$I_{g_i} = E_i B_i (\sin \theta_i - j \cos \theta_i), \quad i \in \{N_g\}$$

Na solução é preciso conhecer somente a sub-matriz  $Z_{gg}$  de ordem  $N_g \times N_g$ .

Chamando  $R_{ik}$  e  $X_{ik}$  as partes real e imaginária da sub-matriz  $Z_{gg}$  às expressões para  $e_i$  e  $f_i$  são:

$$e_i = \sum_{k \in N_g} (R_{ik} D_k + X_{ik} C_k) \quad (3.2.22)$$

$$f_i = \sum_{k \in N_g} (-R_{ik} C_k + X_{ik} D_k)$$

onde:

$$C_k = E_i B_i \cos \theta_i \quad (3.2.23)$$

$$D_k = E_i B_i \sin \theta_i$$

Cálculo de  $P_{g_i}$ :

A potência complexa injetada na  $i$ -ésima barra, para  $i \in \{N_g\}$

$$S_{g_i} = P_{g_i} + j Q_{g_i} = E_i e^{j\theta_i} \cdot I_{g_i}^* \quad (3.2.24)$$

sendo:

$$I_{g_1} = B_1 (E_1 \sin \theta_1 - f_1) - j B_1 (E_1 \cos \theta_1 - e_1)$$

substituindo  $I_{g_1}$  na equação (3.2.24), temos

$$S_{g_1} = E_1 e^{j\theta_1} [B_1 (E_1 \sin \theta_1 - f_1) - j B_1 (E_1 \cos \theta_1 - e_1)]$$

decompondo em suas partes real e imaginária achamos  $P_{g_1}$  e  $Q_{g_1}$

$$P_{g_1} = E_1 B_1 (-f_1 \cos \theta_1 + e_1 \sin \theta_1) \quad (3.2.25)$$

$$Q_{g_1} = E_1^2 B_1 - E_1 B_1 (e_1 \cos \theta_1 + f_1 \sin \theta_1) \quad (3.2.26)$$

Substituindo (3.2.23) em (3.2.25)

$$P_{g_1} = -C_k f_1 + D_k e_1 \quad (3.2.27)$$

onde  $P_{g_1}$  é a potência ativa injetada na  $i$ -ésima barra pelo  $i$ -ésimo gerador.

### 3.3 - FUNÇÃO DE LIAPUNOV TIPO ENERGIA

O modelo matemático de um sistema de potência para a análise de estabilidade transitória é não-linear, invariante no tempo e autônomo [3], de maneira genérica pode ser escrito como

$$\dot{\underline{x}} = f(\underline{x}) \quad f(\underline{x}_e) = 0 \quad (3.3.1)$$

onde:  $\underline{x}(t)$  = vetor de estados de ordem  $\underline{n}$

$\underline{x}_e$  = estado de equilíbrio do sistema, que mediante transformação de coordenadas será transferido para a origem.

$f(\underline{x})$  = função vetorial não-linear de  $\mathbb{R}^n \longrightarrow \mathbb{R}^n$

### Transformação de coordenadas

Se  $\underline{x}_e \neq \underline{0}$ , mediante transformação de coordenadas

$$\underline{y} = \underline{x} - \underline{x}_e \longrightarrow \underline{x} = \underline{y} + \underline{x}_e$$

$$\dot{\underline{y}} = \dot{\underline{x}}$$

onde substituindo em (3.3.1), tem-se

$$f(\underline{x}) = f(\underline{y} + \underline{x}_e)$$

assim para  $\underline{x} = \underline{x}_e$  temos  $\underline{y} = \underline{0}$  ponto de equilíbrio do sistema na origem, isto é

$$\dot{\underline{y}} = \underline{0} = f(\underline{y} + \underline{x}_e)$$

Como  $\underline{x}_e$  é também constante pode-se escrever na forma de (3.3.1)

$$\dot{\underline{y}} = f(\underline{y})$$

### Definição 1: Estabilidade no sentido de Liapunov

O estado  $\underline{y} = \underline{0}$  é estável no sentido de Liapunov se, dado um número real qualquer  $\epsilon > 0$ , existe  $\delta(\epsilon) > 0$ , tal que



$$\| y_0 \| \leq \delta \longrightarrow \| y(t) \| \leq \varepsilon, \quad \forall t > 0$$

onde:

$y_0$  é o estado inicial ou condição inicial em  $t=0$

$\| \cdot \|$  é a norma Euclidiana no  $\mathbb{R}^n$

## Definição 2: Estabilidade assintótica

O estado  $y = 0$  (a origem) é um ponto de equilíbrio assintoticamente estável, se:

i)  $y = 0$  for estável no sentido de Liapunov.

ii)  $\lim_{t \rightarrow \infty} \| y(t) \| = 0$

## Região de estabilidade assintótica [3]

Em muitas situações físicas, a origem pode não ser assintoticamente estável para todas as condições iniciais contidas numa região ao redor da origem. Tal região é chamada a região de estabilidade assintótica ou região finita de atração. Se tal região existe, o cálculo desta região é de muito interesse para o projetista do sistema. Por exemplo, em um sistema de potência multimáquina, se um defeito é eliminado demasiado tarde, o sistema pós-defeito não pode retornar ao estado estável. Isto pode ser interpretado equivalentemente como o cálculo de uma região de atração ao redor do estado estável pós-defeito e determinar se o estado do sistema no ponto de eliminação do defeito permanece dentro desta região ou não.

Definição 3.- A função escalar  $V(x)$  é chamada definida positiva (definida negativa) se  $V(0) = 0$  e ao redor da origem  $V(x) > 0$  ( $< 0$ ) para  $x \neq 0$ .

Definição 4. - A função escalar  $V(\underline{x})$  é chamada semi-definida positiva (semi-definida negativa) se  $V(\underline{0}) = 0$  e se ao redor da origem  $V(\underline{x}) \geq 0$  ( $\leq 0$ ) para  $\underline{x} \neq 0$ .

Os teoremas seguintes exprimem condições suficientes para estudos de estabilidade de sistemas não-lineares e constituem os fundamentos básicos da teoria de Liapunov.

Teorema 1: Se para a origem do sistema (3.3.1) existir uma função  $V: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ , definida em  $D \subset \mathbb{R}^n$  tal que

- i)  $V(\underline{y}) > 0$ ,  $\forall \underline{y} \neq \underline{0}$  Definida positiva em D
- ii)  $\dot{V}(\underline{y}) \leq 0$  Semi definida negativa em D

então,  $\underline{y} = \underline{0}$  de (3.3.1) é estável no sentido de Liapunov.

Teorema 2: Se para a origem do sistema (3.3.1) existir uma função  $V: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ , definida em  $D \subset \mathbb{R}^n$  tal que

- i)  $V(\underline{y}) > 0$  Definida positiva em D
- ii)  $\dot{V}(\underline{y}) < 0$  Definida negativa em D.

então,  $\underline{y} = \underline{0}$  de (3.3.1) é assintoticamente estável.

Teorema 3 : Nas mesmas condições do teorema 2 se  $V$  é definida positiva, a origem de 3.3.1 é instável no sentido de Liapunov.

As funções que satisfazem as condições dos teoremas enunciados acima são chamados Funções de Liapunov.

A idéia principal do método está contida no seguinte

raciocínio: Se a derivada  $\frac{dE}{dt}$  da energia  $E(\underline{x})$  de um sistema físico isolado é negativa para cada possível estado  $\underline{x}$  exceto para um só estado  $\underline{x}_e$ , logo a energia diminui continuamente até alcançar seu valor mínimo  $E(\underline{x}_e)$ . Assim a função  $E(\underline{x})$  pode ser usada como função de Liapunov [3].

Devido a que (3.3.1) é não-linear, existem vários pontos de equilíbrio de modo que nem todas as condições iniciais  $\underline{y}_0$  definem soluções  $\underline{x}(t)$  assintoticamente estáveis no sentido de Liapunov, convergem para o ponto de equilíbrio na origem. Domínio de estabilidade é então definido como sendo o conjunto aberto de condições iniciais, que definem soluções estáveis.

A aplicação do método de Liapunov ao estudo da estabilidade transitória de sistemas de potência, consiste em gerar uma função de Liapunov e, a partir desta, na determinação de um domínio de estabilidade. Dada uma condição inicial qualquer  $\underline{y}_0$ , pode-se calcular o valor da função de Liapunov neste ponto  $V(\underline{y}_0)$  e, compará-lo com um outro valor obtido da solução de um problema de otimização  $V(\underline{y}^*)$ . Ou seja,

$$\text{Min } V(\underline{y})$$

s.a

$$V(\underline{y}) = 0$$

Assim pode-se concluir sobre a " estabilidade transitória do ponto de equilíbrio ", pelo seguinte critério:

- |  |                |
|--|----------------|
| (i) Se $V(\underline{x}_0) < V(\underline{x}^*)$     | ESTÁVEL        |
| (ii) Se $V(\underline{x}_0) \geq V(\underline{x}^*)$ | NADA SE AFIRMA |

A condição ii) decorre do fato dos teoremas fornecerem apenas condições suficientes.

O domínio de estabilidade fica definido por:

$$D = \{ \underline{y} \mid V(\underline{y}) < V(\underline{y}^*) \}$$

### Função Energia

Da equação de oscilação (3.2.8) formulada com referência ao centro de ângulo, pode-se obter a função Energia [3,28]. Define-se a potência acelerante como sendo

$$g_1(\theta) \stackrel{\Delta}{=} P_{m_1} - P_{g_1} - \frac{M_1}{M_T} PCA = M_1 \dot{w}_1 \quad (3.3.2)$$

Multiplica-se a i-ésima equação de potência acelerante de (3.3.2) por  $\dot{\theta}_1$  e forma-se o somatório

$$\sum_{i \in N_g} [M_1 \dot{w}_1 - g_1(\theta)] \dot{\theta}_1 \quad (3.3.3)$$

Integra-se em relação ao tempo usando-se como limite inferior  $t=t_e$ , onde  $w(t_e)=0$  e  $\theta(t_e)=\theta^p$  (estado de equilíbrio estável da configuração do sistema pós-defeito).

Logo:

$$\begin{aligned} E(\theta, w) &= \underbrace{\frac{1}{2} \sum_{i \in N_g} M_1 w_1^2}_{E_c(\theta, w)} - \underbrace{\sum_{i \in N_g} \int_{\theta_1^p}^{\theta_1} g_1(\theta) d\theta_1}_{E_p(\theta, w)} \quad (3.3.4) \\ &= E_c(\theta, w) + E_p(\theta, w) \end{aligned}$$

A expressão acima representa a energia total associada ao sistema (3.2.8)

composta pela soma das energias "cinética  $E_c$  e potencial  $E_p$ ".

### 3.4 - MÉTODO DA SUPERFÍCIE LIMITE DE ENERGIA POTENCIAL

O método considera o modelo clássico de máquina com preservação da topologia da rede conforme mostrado em 3.3. O método SLEP apresenta vantagens de tempo de processamento e não conservatividade face a outros métodos [18,20,28] e resultados compatíveis aos obtidos por simulação numérica (por exemplo usando o programa TRANSDIR).

A conservatividade dos métodos [28] tem a ver com o cálculo da energia crítica em função da configuração do sistema pós-defeito.

Definição 5: "Superfície Limite de Energia Potencial " ( SLEP )

Define-se a SLEP como o conjunto dos pontos  $\theta \in \mathbb{R}^n$  correspondentes aos zeros da derivada direcional, excetuando-se o ponto de equilíbrio estável do sistema que primeiro é alcançado quando se percorre uma direção radial a partir da origem.

Seja  $x$  um estado de equilíbrio estável no sentido de Liapunov do sistema pós-defeito e  $\theta$  um vetor do subespaço de estados dos ângulos. Sendo a energia potencial

$$E_p(\theta, w) = - \sum_{i \in N_g} \int_{\theta_i^p}^{\theta_i} g_i(\theta) d\theta_i \quad (3.4.1)$$

A sua derivada direcional [28] ao longo da direção  $(\theta - \theta_p)$  é

$$D(\theta) = - \frac{1}{\|\theta - \theta^p\|} \langle g(\theta), (\theta - \theta^p) \rangle \quad (3.4.2)$$

onde  $\theta$  é um ponto sobre a trajetória do sistema e  $\theta^p$  o ponto de equilíbrio pós-defeito,  $\theta$  e  $\theta^p$  são componentes angulares do estado do sistema.

A derivada direcional  $D(\theta)$  possui a propriedade de se manter "sempre positiva para trajetórias estáveis" no interior da região definida pela SLEP, igual a zero para cruzamento sobre a SLEP e negativa para pontos sobre trajetórias que a cruzam e que não pertencem à região definida pela SLEP [28]. Logo a SLEP define um limite de separação entre regiões de estabilidade e de instabilidade para uma determinada contingência.

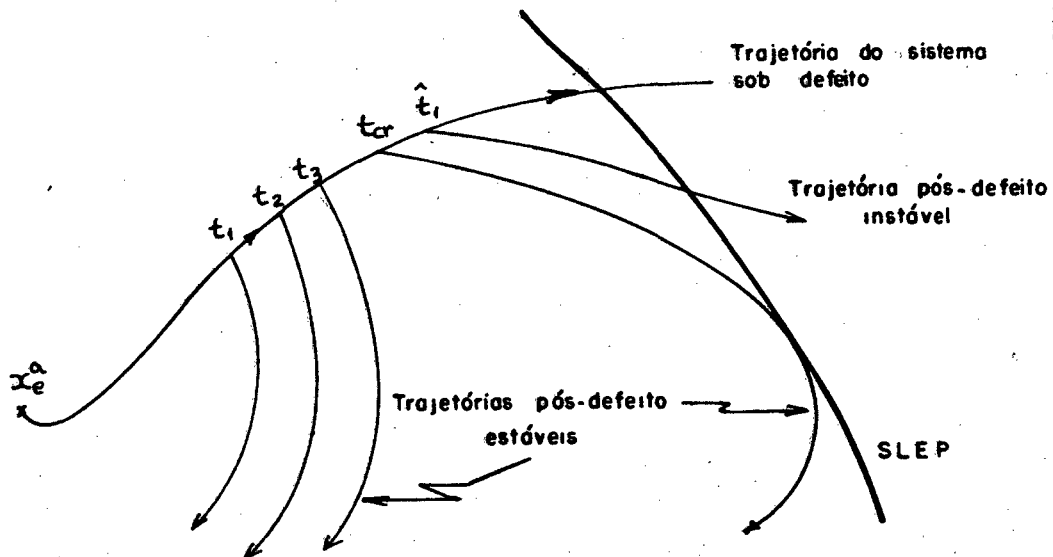


Figura 3.1 SLEP

#### Definição 6: " Energia Crítica "

Define-se Energia Crítica como sendo a máxima energia que o sistema pode adquirir durante um defeito, de modo que, após a retirada do mesmo, as trajetórias do sistema ainda evoluem para um estado de equilíbrio.

O algoritmo para o cálculo da energia crítica e tempo crítico

de eliminação do defeito consiste em se monitorar a derivada direcional da função energia potencial ao longo das trajetórias de estados do sistema sob-defeito e pós-defeito, obtidas de forma rápida e aproximada, utilizando-se expansão em série de Taylor, cujos coeficientes são recalculados ao longo do tempo antes que a trajetória aproximada comece a diferir de forma inaceitável da trajetória real.

Então, procura-se um ponto na trajetória sob-defeito, tal que a trajetória sob-defeito, que começa neste ponto, tenha máxima aproximação à SLEP. Isto pode ser efetuado tomando-se duas estimativas da energia crítica:

- A energia crítica pessimista: é a energia total do sistema procedente de uma trajetória estável.

- A energia crítica otimista : é a energia total do sistema procedente de uma trajetória instável.

Inicialmente arbitra-se a energia pessimista igual a zero e, a otimista idêntica à energia potencial máxima com a falta mantida , i.e., para  $D(\theta) = 0$ . Uma nova estimativa é ,então , determinada tomando-se a média aritmética entre as duas estimativas. O processo é repetido até que a diferença entre tais energias satisfaça uma tolerância pré-estabelecida ou um número máximo de iterações especificado for realizado.

O tempo crítico de eliminação do defeito correspondente, é obtido calculando a energia total do sistema com o defeito mantido e tomando o tempo relativo ao estado, no qual a energia total é igual à energia crítica (última estimativa obtida) [18,28].

### 3.5 - MARGEM DE SEGURANÇA

O diagnóstico da estabilidade transitória de um sistema ante a

ocorrência de contingências pode ser efetuado através da chamada Margem de segurança dinâmica, calculada com ajuda do programa SLEP.

A margem de segurança dinâmica pode ser entendida como sendo uma medida da distância em relação à situação de instabilidade do sistema [20,23,28]. Matematicamente:

$$M_k = \frac{E_{cr_k} - E_{e_k}}{E_{cr_k}} \quad (3.5.1)$$

onde:

$M_k$  = margem de segurança da contingência "k".

$E_{e_k}$  = energia total do sistema correspondente ao tempo de eliminação do defeito associada à contingência k.

$E_{cr_k}$  = Energia crítica total do sistema associada à contingência k.

Se:

$$M_k = \begin{cases} > 0 & , \text{ o sistema é estável frente a ocorrência da contingência k.} \\ \leq 0 & , \text{ sistema é instável.} \end{cases}$$

Outra característica da margem de segurança é que permite classificar as contingências de acordo ao grau de severidade delas.

Definição 7: " Margem de segurança do sistema "

Define-se a Margem de segurança do sistema [28], como sendo a menor das margens de um conjunto de contingências,

$$M_s = \min_k (M_k)$$

Esta margem  $M_s$ , permite ter um diagnóstico da segurança



dinâmica do sistema em relação ao conjunto de contingências analisadas, e por tanto o indicativo da necessidade ou não de tomar ações corretivas.

### 3.6 - CONCLUSÕES

Foram mencionadas as diferenças entre a análise de segurança estática e a análise de segurança dinâmica. No primeiro caso não é considerada a transição do estado normal ao estado pós-defeito, podendo dar lugar a avaliações sem precisão do desempenho do sistema frente a perturbações tipo curto-circuito.

Ressalta-se a necessidade de se realizar estudos de estabilidade transitória do ponto de operação pós-defeito, utilizando-se métodos diretos por suas características de rapidez e confiabilidade.

O método SLEP para o análise da estabilidade transitória foi apresentado. Também foi definida a margem de segurança dinâmica que servirá como indicativo da necessidade ou não de tomar ações corretivas, como as que serão apresentadas no Capítulo 4.

## CAPITULO 4

DESPACHO ECONÔMICO COM SEGURANÇA DINÂMICA

## 4.1 - INTRODUÇÃO

Este capítulo trata do Despacho Econômico com Segurança Dinâmica, ou seja, da obtenção de um ponto de operação econômico e seguro com relação à estabilidade transitória. O problema é formulado através da programação linear, de modo similar ao modelo apresentado para o despacho econômico no Capítulo 2, porém levando-se em conta a **estabilidade transitória**, incluída como uma parcela na função objetivo que traduz segurança dinâmica e através da sua avaliação a cada etapa do algoritmo.

## 4.2 - MELHORIA DA SEGURANÇA DINÂMICA [MSD]

Através da análise de estabilidade transitória é possível obter-se um diagnóstico do comportamento do sistema frente a contingências tipo curto-circuito e saída de linha, utilizando-se o conceito de margem de segurança do sistema.

Se esta margem for negativa ou menor que um valor mínimo permissível, deve-se tomar medidas corretivas que alterem as condições de operação do sistema com o propósito de se obter um ponto de operação mais seguro via redespacho de geração. Isto pode ser feito usando-se um critério decorrente do método SLEP utilizado na análise de estabilidade transitória. Para isto vale-se de um vetor  $s$ , que indica uma direção viável para a modificação das gerações [22].

A estratégia a seguir para melhorar a segurança consiste na

formulação de um problema de otimização onde se maximiza o acréscimo de margem  $\Delta M$ , considerando-se restrições de operação do sistema tipo equação de balanço de potência, limites de capacidade de geração das máquinas e fluxo de potência nas linhas de transmissão.

Assim sendo, o problema de despacho pode ser formulado do seguinte modo :

$$\begin{aligned} \text{Max } \Delta M &= (-S)^T \cdot \Delta PG \\ \text{s.a} & \\ \underline{h}(PG) &= \underline{0} \\ \underline{g}(PG) &\leq \underline{0} \end{aligned} \quad (4.1.1)$$

onde :  $\Delta M$  = Função objetivo representando o acréscimo da margem de segurança.

$S$  = Direção viável para a melhoria da margem de segurança, definido pelo vetor  $s$ .

$\underline{h}, \underline{g}$  = Restrições de operação definidas em (2.2.3) e (2.2.5).

O redespacho de geração produz como resultado uma variação na margem de segurança do sistema. O acréscimo da margem  $\Delta M$  é conseguido variando-se a potência mecânica de entrada da máquina síncrona, na direção indicada pelo vetor  $s$ , assim pode-se escrever,  $\Delta M = f(s, \Delta P_m)$ .

A seguir é apresentado o critério para a melhoria de segurança.

#### 4.2.1- VETOR $s$

O vetor  $s$  representa uma direção viável para melhorar a

segurança do sistema [22]. Ele é definido pelo ponto de tangência da trajetória pós-defeito com o politopo  $L$  e o ponto de equilíbrio pós-defeito. No anexo B é apresentada a formulação matemática do politopo para sua utilização no cálculo de domínios de estabilidade e definição da direção  $s$  de melhoria de segurança.

Considerando-se o modelo do sistema sem condutâncias ( $G_{ij} = 0$ ) como um caso particular do modelo com condutâncias, o conceito de Superfície Limite de Energia Potencial (SLEP) pode também ser utilizado. O politopo  $L$ , referido ao centro de ângulos, constitui uma aproximação da SLEP e está contido no interior da região definida por esta superfície. Logo a fronteira  $L$  é alcançada antes que a SLEP, pelos raios emanados da origem.

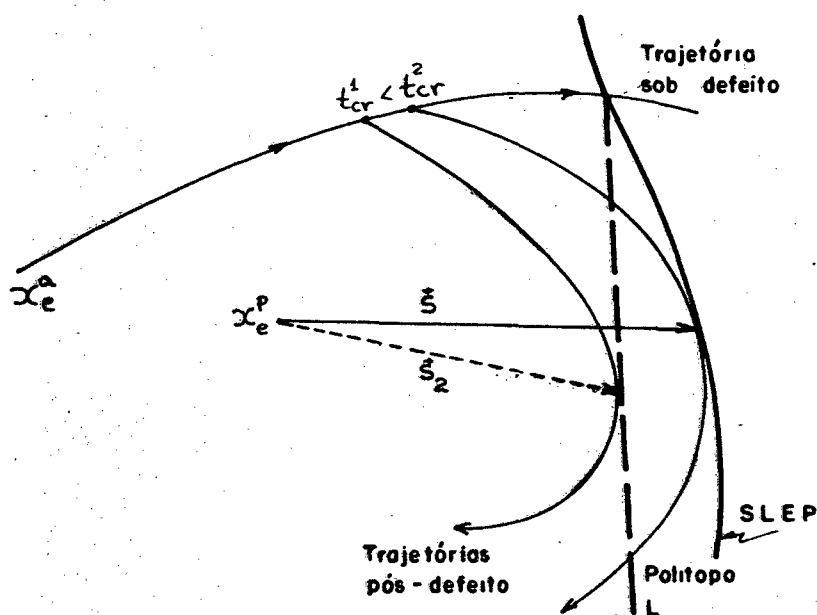


Figura 4.1 Vetor  $s$

Uma trajetória pós-defeito que tangencia o politopo também

determina um domínio de estabilidade, contido no domínio de estabilidade limitado pela trajetória que tangencia a SLEP. Assim, afastar o ponto de equilíbrio da face onde ocorre a tangência da trajetória pós-defeito com o politopo L, implica aumentar o domínio de estabilidade do sistema (aumentar o tempo crítico).

Para o caso em que as condutâncias tendem a zero, a direção  $s$  definida pela SLEP tende a  $s_2$ , conforme a figura 4.1. Assim no caso em que as condutâncias de linha são consideradas, toma-se  $s$  como uma boa aproximação da direção ao longo da qual devem ser alterados os despachos para aumentar a segurança do sistema. Esta direção é sempre calculada durante um procedimento para determinação de tempos críticos e/ou margens de segurança, usando o programa SLEP.

#### 4.3 - FORMULAÇÃO DO DESPACHO ECONÔMICO COM SEGURANÇA DINÂMICA

No planejamento da operação de um sistema de potência procura-se atender a demanda com segurança e economia. Se o sistema é inseguro para um determinado ponto de operação, pode-se mediante redespacho de geração melhorar a segurança dinâmica do sistema, mas em geral acompanhada de um aumento no custo de operação, conforme é mostrado no Capítulo 5.

A seguir será postulada uma formulação alternativa para a melhoria da segurança dinâmica considerando no problema o custo de operação do sistema. Isto é, procura-se uma solução de compromisso entre segurança dinâmica e operação econômica do sistema.

#### 4.3.1 - FUNÇÃO OBJETIVO

A função objetivo pode-se escrever :

$$FO = < C^T, \Delta PG > + < S^T, \Delta PG > \quad (4.3.1)$$

onde :  $C$  = Vetor custo de geração das máquinas.

$S$  = Vetor  $s$  que indica uma direção na qual a segurança dinâmica é melhorada.

$\Delta PG$  = Vetor acréscimo de geração das máquinas.

Na função objetivo observa-se a presença de duas parcelas, a primeira procura minimizar o custo de operação e a segunda visa melhorar a segurança dinâmica do sistema. A direção resultante na função objetivo é obtida a partir da normalização dos vetores  $C$  e  $S$  calculados em cada iteração.

Conforme seja o valor da margem de segurança do sistema pode-se ter na função objetivo simplesmente a parcela do custo, de segurança ou ambas.

#### 4.4 - INTERPRETAÇÃO FÍSICA

O significado físico da inclusão do termo de segurança na função objetivo é simular um aumento do custo incremental de geração  $\frac{df_1}{dPG_1}$  de cada máquina dado por (2.3.17), cujo aumento de suas gerações comprometem a segurança do sistema. Assim, elas são forçadas a diminuir sua geração conforme as respectivas componentes de  $\underline{C}^T$  e  $\underline{S}^T$ .

A figura 4.2 ilustra o custo incremental de geração modificado como resultado da inclusão do critério de segurança dinâmica.

Observa-se que, o custo incremental do gerador 1 cresce enquanto que do gerador 2 diminui. Isto significa que "aumentar a geração da máquina 1 influi na redução do nível de segurança do sistema", de forma análoga, diminuir a geração da máquina 2 contribui para a melhoria da segurança.

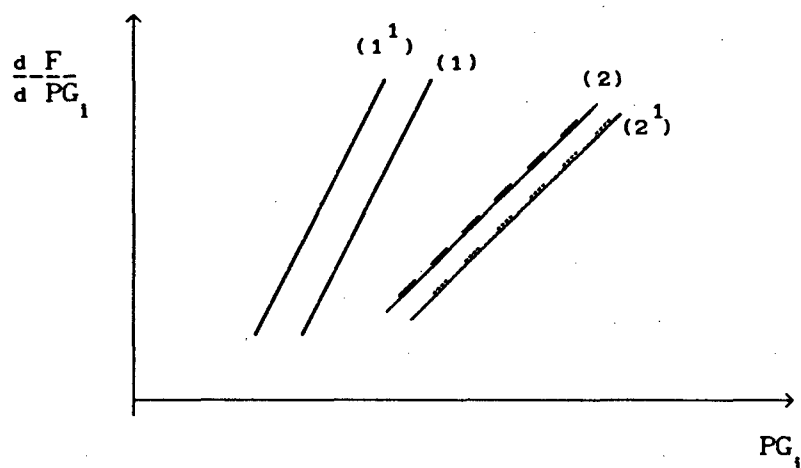


Figura 4.2 Custos de geração afetados pela segurança dinâmica.

O superescrito (.<sup>1</sup>) indica a consideração de segurança.

#### 4.5 - MODELO DE OTIMIZAÇÃO

Assim o modelo de otimização na forma padrão de programação linear é

1. FUNÇÃO OBJETIVO

$$FO = \underline{C}^T \cdot \underline{\Delta PG} + \underline{S}^T \cdot \underline{\Delta PG}$$

s.a

2. EQUAÇÃO DE BALANÇO DE POTÊNCIA

$$\sum_{i \in Ng} \left( 1 - \frac{\partial P_L}{\partial PG_i} \right) \bigg|_{PG^k} \cdot (PG_i - PG_i^k) = 0 \quad (4.3.2)$$

3. LIMITE DE GERAÇÃO DAS MÁQUINAS

$$PG^{min} \leq PG \leq PG^{max}$$

4. FLUXO DE POTÊNCIA ATIVA NAS LINHAS

$$T^{min} \leq T(PG) \leq T^{max}$$

5. DESVIO DE GERAÇÃO

$$| PG - PG^0 | \leq \Delta$$

Sendo que as características do problema são eminentemente não-lineares, a metodologia proposta consiste na linearização sucessiva da função objetivo e restrições em torno da solução anterior  $PG^{k-1}$ . Procurando-se que a linearização seja mais fiel com respeito ao modelo não-linear, as variações de  $PG^{k-1}$  para  $PG^k$  são fixadas em torno de 2 a 5 % (XPG). A variável  $\Delta$  é igual a  $(ICONIT * XPG/100)$ , onde ICONIT é o número de iterações no processo de linearizações sucessivas.



#### 4.6 - ALGORITMO PRINCIPAL

Descreve-se neste algoritmo os passos do programa principal "Despacho Econômico com Segurança Dinâmica" (DESD), que gerencia os programas SLEP e REDESPACHO para a análise da estabilidade transitória e o redespacho de geração visando economia e segurança dinâmica respectivamente.

- PASSO 1 :       Entrada de dados.
- PASSO 2:       Cálculo do ponto de operação pré-defeito.
- PASSO 3 :       Simular o comportamento do sistema com relação a k-ésima contingência.
- PASSO 4 :       Analisar a estabilidade transitória do ponto de operação pós-defeito e determinar a margem de segurança ( $M_k$ ) associada à k-ésima contingência.
- PASSO 5 :       Calcular o vetor s.
- PASSO 6 :       É a última contingência ?
- NÃO,  $k = k + 1$  , Voltar ao passo 3.
- SIM, Calcular a margem do sistema ( $M_s$ ).
- PASSO 7:       Margem do sistema ( $M_s$ ) <  $M_{min}$  ?
- NÃO, O custo é satisfatório ?
- SIM, Imprimir resultado e pare.
- NÃO, Vá ao próximo passo.
- SIM, vá ao Próximo passo.
- PASSO 8 :       Redespacho de geração.
- Programa despacho com segurança dinâmica.
- Voltar ao passo 2.

No próximo item, são apresentados os passos do algoritmo REDESPACHO, utilizado para realocar a geração entre as unidades do sistema seguindo os critérios de economia e/ou segurança.

#### 4.6.1 - ALGORITMO REDESPACHO DE GERAÇÃO

PASSO 1 :       Leitura de dados.

- dados de barras, linhas e transformadores.
- coeficientes da função custo de geração de cada unidade.
- limites máximo e mínimo de geração das unidades.
- fluxo máximo nas linhas de transmissão.
- ICONIT, contador de iterações e multiplicador para definir a capacidade de geração das unidades em cada iteração.

PASSO 2 :       Determinação do fluxo nas linhas, as tensões e ângulos nas barras do sistema para a geração atual.

PASSO 3 :       Identificam-se as linhas com fluxo de potência ativa maior que 95% de sua capacidade máxima.

- Estas linhas serão incluídas como restrições no problema de otimização.

PASSO 4 :       Cálculo do custo total de geração antes do despacho.

PASSO 5 :       Cálculo da capacidade de geração de cada unidade.

$$PG^0 \pm (ICONIT * XPG/100). \quad , \quad XPG = 3.0 \%$$

PASSO 6 :       Cálculo das perdas incrementais de transmissão  $\left[ \frac{\partial PL}{\partial PG} \right]$ .

PASSO 7 :       Cálculo da matriz H, que relaciona as injeções de potência ativa com os fluxos nas linhas.

PASSO 8 :       Preparação dos dados para programação linear.

- Formação das restrições de trânsito nas linhas.

- Definição da função objetivo linearizada.

$$FO = < C^T, \Delta PG > + < S^T, \Delta PG >$$

PASSO 9 : Programação linear:

Solução do problema pelo método simplex revisado e fazendo uso da técnica de relaxação.

Resultado : Vetor PG .

PASSO 10 : Verificar se a saída do despacho satisfaz a todos os limites de trânsito nas linhas. Utilizar fluxo de potência linearizado.

PASSO 11 : Existe sobrecarga ?

- SIM, Incluir as linhas sobrecarregadas como restrições no problema. Vá ao PASSO 8.
- NÃO, prepara dados para a próxima iteração.

- FIM, imprime saída do despacho para a iteração k.

#### 4.6.1 - ALTERNATIVA NO CRITÉRIO DE PARADA

Como alternativa ao critério de parada definido no passo 7 do algoritmo principal, pode-se propor afetar o custo por um "PESO", cujo valor será escolhido conforme seja o valor da margem de segurança. Assim a função objetivo é

$$FO = < PESO * C^T, \Delta PG > + < S^T, \Delta PG >$$

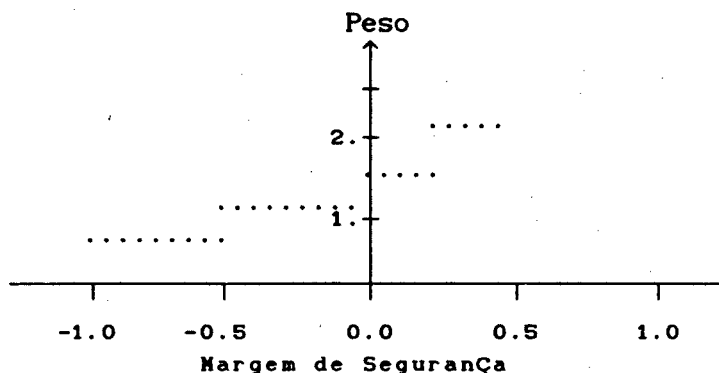


Figura 4.2 PESO x Margem de segurança

Na figura 4.2 é ilustrado os valores que o "PESO" poderia tomar e que são definidos de forma heurística para diversos valores de margem de segurança. Ou seja

Se  $(Margem \leq -1.0)$   $Peso = 0.0$

Se  $(-1.0 < Margem \leq -0.5)$   $Peso = 0.5$

Se  $(-0.5 < Margem \leq 0.0)$   $Peso = 1.0$

Se  $(0.0 < Margem \leq 0.3)$   $Peso = 1.5$

Se  $(0.3 < Margem)$   $Peso = 2.0$

Na figura 4.3, é mostrada a interpretação geométrica de afetar o custo pelo PESO. Observa-se que o vetor resultante dos vetores normalizados S e C, conforme seja o valor da margem de segurança, se aproxima mais a S ou a C. Por exemplo, se a margem do sistema é muito negativa (valores menores a -1) a resultante é o proprio vetor s, porquanto o PESO é igual a zero. Se a margem de segurança tem um valor considerado bom para o sistema, então a resultante esta mais proxima de C, mas não desconsidera totalmente a segurança.



que consideram economia e segurança dinâmica. Dito de outra forma, o custo incremental de geração é penalizado pela segurança, visando encarecer a geração daquela(s) máquina(s) que afetam a segurança.

## CAPITULO 5

### APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

#### 5.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo, apresentam-se os resultados dos casos estudados utilizando o algoritmo de Despacho Econômico com Segurança Dinâmica, que visa um ponto de operação econômico e/ou seguro do ponto de vista da estabilidade transitória.

O sistema de potência utilizado para o estudo é um equivalente estático de uma possível configuração do Sistema Sul do Brasil, com 45 barras e 10 máquinas. Este sistema foi obtido da referência [28].

Os dados relativos às condições de operação do sistema, parâmetros de linhas e transformadores e parâmetros dos rotores, estão apresentados no Anexo A.

#### 5.2 - CASOS ESTUDADOS

No exemplo 1 é apresentado o despacho de geração resultante da aplicação de um critério de segurança estática. Os resultados são testados em relação a sua estabilidade transitória.

No exemplo 2, são analisados os seguintes casos:

##### a) Despacho Econômico

Para a solução de cada iteração é analisada a estabilidade transitória.

b) Redespacho de geração visando somente melhorar a segurança dinâmica do sistema.

c) Redespacho de geração visando economia e segurança dinâmica.

No exemplo 3 parte-se do despacho de segurança apresentado no exemplo 1 e é realizado um redespacho com economia e segurança dinâmica. Os custos são os mesmos do exemplo 2.

No exemplo 4 as perdas de transmissão são levadas em conta na função objetivo junto com o custo de geração.

A análise da estabilidade transitória é realizada considerando curto circuito com eliminação do defeito em 6 ciclos (0.10 seg.).

As variações de geração permitidas entre uma iteração e outra no redespacho foram estabelecidas em 3% .

### 5.3 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nas tabelas 5.3.1 a 5.3.6 são apresentados os resultados para os casos estudados, mostrando-se as variações de geração sugeridas pelo redespacho, o custo total de geração, as perdas totais de transmissão e também a margem de segurança dinâmica do sistema.

#### 5.3.1 - EXEMPLO 1

Este exemplo foi extraído da referência [29]. Naquele trabalho apresentou-se o despacho mostrado na coluna 3 da tabela 5.3.1 como sendo o despacho de geração resultante da aplicação de critérios de segurança estática, que considera saída de equipamentos (linha, transformadores, etc.) e/ou racionamento de carga. Em [27] comenta-se que seria necessária uma análise de estabilidade transitória.

Na tabela 5.3.1 também é apresentado o despacho inicial, as perdas de transmissão e a margem de segurança dinâmica do sistema considerando-se curto circuito e perda de linha. As contingências analisadas



estão mostradas no Anexo A.

Tabela 5.3.1 Despacho de segurança estática

BARRA	GER. BASE [ MW ]	GER. CORRIGIDA [ MW ]
366	650.0	748.0
369	215.0	220.0
373	1050.0	1050.0
381	1110.0	692.0
390	1325.0	1658.0
392	90.0	92.0
394	120.0	122.0
395	241.0	245.0
397	1357.5	1107.0
407	490.0	500.0

PERDAS TOTAIS DE TRANSMISSÃO [MW]	178.95
MARGEM DE SEGURANÇA DINÂMICA	-0.265

Para o despacho obtido foi analisada a estabilidade transitória com ajuda dos programas SLEP e TRANSDIR. Observa-se que a margem de segurança é negativa, o que indica instabilidade. Este resultado é comprovado analisando-se as curvas associadas à contingência mais crítica mostrada na figura 5.1.

Os resultados evidenciam então, a necessidade de se levar em conta a estabilidade transitória.

### 5.3.2 - EXEMPLO 2

Os custos de geração escolhidos para este exemplo têm caráter puramente didático, porquanto procura-se mostrar que se o objetivo é minimizar o custo total de geração, aumentando a geração nas máquinas de custo incremental mais baixo e contrário nas mais caras, a segurança do sistema não

melhora necessariamente.

a) Despacho Econômico

A função objetivo é o custo total de geração, sujeita às restrições de operação do sistema, segundo formulação em (2.3.1).

$$FO = < C^T, \Delta PG >$$

Tabela 5.3.2 : Despacho econômico puro

BARRA	GER. BASE [ MW ]	ITER. 1 [ MW ]	ITER. 2 [ MW ]	ITER. 3 [ MW ]	ITER. 4 [ MW ]	ITER. 5 [ MW ]
366	650.0	669.5	689.0	708.5	728.0	747.5
369	215.0	220.0	220.0	220.0	220.0	220.0
373	1050.0	1050.0	1050.0	1050.0	1050.0	1050.0
381	1110.0	1088.5	1081.6	1077.0	1070.0	1064.0
390	1325.0	1285.0	1245.5	1205.7	1166.0	1126.0
392	90.0	87.3	84.6	82.0	79.0	76.5
394	120.0	116.4	112.8	109.0	105.0	102.0
395	241.0	233.4	226.5	219.0	212.0	205.0
397	1357.5	1397.7	1438.4	1479.0	1520.0	1560.0
407	490.0	500.0	500.0	500.0	500.0	500.0

**RESULTADOS APOS O REDESPACHO DE GERAÇÃO**

CUSTO $[\frac{u.\$}{h}]$	113687	112895	112412	111996	111544	111135
PERDAS [MW]	175.5	176.0	176.6	177.0	178.0	179.0
MARGEM SEG.	-0.250	-0.255	-0.249	-0.244	-0.273	-0.260

Pode-se observar:

O custo total de geração diminui com respeito ao caso base em 2.24 % até a quarta iteração.

A margem de segurança mantém-se negativa para os diversos despachos obtidos e o custo mínimo é 108.221,60 [u\$/h], quando a capacidade máxima das máquinas é alcançada.

Na tabela 5.3.2 é importante observar que a não inclusão das perdas na função objetivo leva a uma solução onde as perdas aumentam com os despachos que diminuem o custo.

#### b) Melhoria da segurança

Neste problema, a função objetivo considera-se o produto escalar do vetor  $s$  pelo vetor de despacho, que indica uma direção no sentido de melhorar a segurança dinâmica do sistema e o vetor acréscimo de potência de geração.

$$FO = \langle S^T, \Delta PG \rangle$$

Tabela 5.3.3 : Melhoria da segurança dinâmica

BARRA	GER. BASE [ MW ]	ITER. 1 [ MW ]	ITER. 2 [ MW ]	ITER. 3 [ MW ]	ITER. 4 [ MW ]
366	650.0	630.5	689.0	591.5	572.0
369	215.0	208.6	220.0	195.5	189.2
373	1050.0	1018.5	987.0	955.0	924.0
381	1110.0	1143.3	1176.6	1209.9	1243.0
390	1325.0	1311.8	1245.5	1306.8	1305.0
392	90.0	92.0	92.0	92.0	92.0
394	120.0	122.0	122.0	122.0	122.0
395	241.0	245.0	245.0	245.0	245.0
397	1357.5	1397.7	1402.0	1479.0	1560.6
407	490.0	475.3	460,6	446.0	416.5

#### RESULTADOS APOS O REDESPACHO DE GERAÇÃO

CUSTO [ $\frac{u.\$}{h}$ ]	113687	114757	114502	117194	118468
PERDAS [MW]	175.5	172.5	167.0	169.3	168.5
MARGEM SEG.	-0.250	0.011	0.331	0.429	0.524

Na tabela 5.3.3 pode-se observar que o redespacho de geração foi feito no sentido de melhorar a segurança do sistema. O custo de geração obtido em cada iteração é mais elevado, tendo um aumento total de 4.2 % nas 4 iterações mas, em compensação a margem de segurança também aumenta, garantindo

estabilidade transitória no caso de ocorrência de qualquer uma das contingências consideradas.

c) Despacho econômico com segurança dinâmica

A função objetivo é definida pelo produto escalar da soma do vetor custo de geração e o vetor  $s$  com o vetor acréscimo de geração.

$$FO = < C + s, \Delta PG >$$

Tabela 5.3.4 : Despacho econômico com segurança dinâmica

BARRA	GER. BASE [ MW ]	ITER. 1 [ MW ]	ITER. 2 [ MW ]	ITER. 3 [ MW ]	ITER. 4 [ MW ]
366	650.0	669.5	689.0	708.5	728.0
369	215.0	208.6	220.0	195.5	189.2
373	1050.0	1018.5	987.0	955.0	924.0
381	1110.0	1127.9	1176.6	1185.0	1214.0
390	1325.0	1285.5	1245.5	1205.7	1166.0
392	90.0	87.3	92.0	82.0	79.2
394	120.0	116.4	122.0	109.0	105.6
395	241.0	234.4	245.0	219.0	212.0
397	1357.5	1397.7	1361.0	1479.0	1520.0
407	490.0	500.0	500.0	500.0	500.0

**RESULTADOS APOS O REDESPACHO DE GERAÇÃO**

CUSTO [ $\frac{u.\$}{h}$ ]	113687	113748	113683	114345	114695
PERDAS [MW]	175.5	172.6	166.0	168.0	166.0
MARGEM SEG.	-0.250	0.010	0.326	0.429	0.586

Pode-se observar:

- No caso base o custo é 113687 [u.\$/h] e a margem negativa, depois de 4 iterações tem-se um aumento no custo de somente 0.88%, contra 4.2% de aumento no caso de se considerar só melhoria da segurança. A margem de segurança é positiva. Na iteração 1, prevalece a melhoria da margem e com isto

o custo aumenta. A iteração 2 espelha a nova tentativa de diminuição do custo e aumento da margem tendo em vista a folga e a nova direção definida na iteração anterior. Na iteração 3, embora a margem venha a melhorar, o custo novamente aumenta. Neste caso pode-se parar o processo, uma vez que se obteve um mínimo local para o custo, e a margem de segurança do sistema é positiva.

### 5.3.3 - EXEMPLO 3

Partindo do despacho de segurança apresentado no exemplo 1, é efetuado um redespacho de geração na procura de um ponto econômico e seguro, sabido que inicialmente ele é inseguro. Na função objetivo aparece o custo e o vetor  $s$ , semelhante ao exemplo 2.c. Os resultados obtidos estão na tabela 5.3.5, onde o despacho inicial é modificado para garantir segurança dinâmica, com implicação de aumento do custo.

Tabela 5.3.5 : Redespacho econômico seguro

BARRA	GER. BASE [ MW ]	ITER. 1 [ MW ]	ITER. 2 [ MW ]	ITER. 3 [ MW ]	ITER. 4 [ MW ]
366	748.0	748.0	748.0	748.0	748.0
369	220.0	213.4	206.8	200.2	193.6
373	1050.0	1018.5	987.0	955.0	924.0
381	692.0	712.8	733.5	754.3	775.0
390	1658.0	1638.4	1618.8	1600.3	1581.7
392	92.0	92.0	92.0	92.0	92.0
394	122.0	122.0	122.0	122.0	122.0
395	245.0	245.0	245.0	245.0	245.0
397	1007.0	1140.2	1173.4	1206.6	1239.8
407	500.0	500.0	500.0	500.0	500.0

#### RESULTADOS APOS O REDESPACHO DE GERAÇÃO

CUSTO $[\frac{u.\$}{h}]$	111439	111917	112404	112935	113470
PERDAS [MW]	178.9	175.6	172.5	169.8	167.4
MARGEM SEG.	-0.265	-0.017	0.326	0.432	0.583

Uma solução aceitável já é obtida na iteração 2 onde a margem já é positiva e o custo muda menos. O aumento no custo de operação considerando as 4 iterações é de 1.82 % com respeito ao caso base.

#### 5.3.4 - EXEMPLO 4

Foi observado que junto com a melhoria da segurança dinâmica as perdas de transmissão diminuem e, quando a segurança piora, as perdas aumentam. Neste exemplo será analisado o efeito de caminhar na direção de minimizar as perdas de transmissão e seu efeito sobre a segurança dinâmica do sistema. Para isto, seguindo a formulação do exemplo 2.b), onde a segurança é procurada pela presença do vetor  $s$ , este agora será trocado pelo gradiente da função perdas de transmissão. Os dados são os mesmos que do exemplo 2.a) onde o custo é diminuído adequadamente, mas em detrimento da segurança do sistema que fica com margem negativa.

A função objetivo será dada pela soma dos vetores unitários do custo de geração e o gradiente das perdas de transmissão.

$$FO = < C + \frac{\partial PL}{\partial PG}, \Delta PG >$$

Tabela 5.3.6 : Despacho econômico e perdas mínimas

BARRA	GER. BASE [ MW ]	ITER. 1 [ MW ]	ITER. 2 [ MW ]	ITER. 3 [ MW ]	ITER. 4 [ MW ]
366	650.0	669.5	689.0	708.5	728.0
369	215.0	220.0	220.0	220.0	220.0
373	1050.0	1018.5	987.0	955.5	924.0
381	1110.0	1143.3	1176.6	1210.0	1243.0
390	1325.0	1285.2	1245.5	1205.7	1166.0
392	90.0	92.0	92.0	92.0	92.0
394	120.0	122.0	122.0	122.0	122.0
395	241.0	245.0	245.0	245.0	245.0
397	1357.5	1347.3	1360.7	1376.5	1392.0
407	490.0	500.0	500.0	500.0	500.0

### RESULTADOS APOS O REDESPACHO DE GERAÇÃO

CUSTO [ $\frac{u.\$}{h}$ ]	113687	113530	113666	113870	114086
PERDAS [MW]	175.5	170.5	166.5	163.0	159.5
MARGEM SEG.	-0.250	-0.004	0.326	0.437	0.533

Em cada iteração foi monitorado o ângulo que formam o vetor  $s$  e o gradiente das perdas de transmissão, dando em média um ângulo de  $36^\circ$ , o que indica que eles caminham mais ou menos juntos. Quanto aos resultados observa-se que a margem de segurança aumenta favoravelmente, e os custos são maiores comparados ao caso base e da mesma ordem que no exemplo 2.c). As perdas de transmissão são ligeiramente menores que no exemplo 2.c).

#### 5.4 - CRITÉRIO DE PARADA

O critério de parada adotado para o algoritmo, conforme o caso pode ser menor custo ou margem de segurança maior ou igual à margem desejada para o sistema .

No exemplo 2, caso b, onde se procura puramente melhorar a segurança do sistema, a regra de parada deve ser pelo critério da margem porquanto a tendência do custo é sempre de aumentar. Outra alternativa poderia ser aceitar somente uma porcentagem de acréscimo no custo em relação ao custo do caso base. No caso c , pode-se adotar os mesmos critérios.

Nos exemplos 3, 4 e 5, o critério de parada deve ser por margem desejada para o sistema. Uma outra alternativa pode ser aquela discutida na seção 4.7 do capítulo 4, mas por seu caráter heurístico são necessários mais testes para afinar os valores para o PESO.

## 5.5- CONCLUSÕES

Neste capítulo foram apresentados exemplos de aplicação da metodologia proposta no capítulo 4.

Foi mostrado, no caso de se despachar o sistema apenas considerando-se custo de geração, pode-se obter resultados cujos despachos não suportam uma análise de contingências considerando-se curto circuito seguido de perda de linha e/ou transformador .

Neste caso, com o uso da metodologia para correção da segurança baseado no vetor  $s$ , foi mostrado que é possível melhorar a segurança do sistema, com sacrificio da solução ótima obtida considerando-se somente custo.

Observou-se também que as perdas variam em sentido contrário ao da segurança isto é, aumentar as perdas significa diminuição do nível de segurança e vice-versa. Em todos os resultados obtidos é observada esta relação. Isto sugere o uso da informação contida na expressão das perdas do sistema para definição da direção de melhoria da segurança. Isto foi feito no exemplo 4 e os resultados foram satisfatórios.



CASO EXEMPLO 1

CURTO 374 / LINHA RETIRADA :374 - 375 TRD=0.10

DATE 08/09/90 TIME 00.02.40

ANGLE IN DEGREES

(ANGLES RELATIVE TO BUS 397, SEGREDO.13.8, ROTOR 1)

	-200.0	-166.7	-133.3	-100.0	-66.7	-33.3	-0.0	33.3	66.7	100.0	133.3	166.7	200.0
	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V
0.0						6 8	9 4	35					
						6 8	9 4	35					
						678	2941	35					
						6 8	941	35					
						678	291	5 3					
0.250						6 8	4291	5 3					
						678	4 92	5 3					
						678	4 92	5 3					
						678	4 19 2	5 3					
						678	4 1 9 25	3					
0.500						6 78	4 1 9 5 2	3					
						6 8	41 9 5 2	3					
						678	41 95 2	3					
						6 8	41 9 2	3					
						678	41 59 2	3					
0.750						678	4 1 59 2	3					
						678	4 1 59 2	3					
						678	4 1 59 2	3					
						6 8	4 1 9 2	3					
						678	4 1 9 5 2	3					
						678	4 1 9 5 2	3					
						678	4 1 9 2 5	3					
						678	4 19 5	3					
1.000						2 678	49 5	3					

Figura 5.1 - Curvas de oscilação dos ângulos dos rotores.

Contingência mais crítica. (saida TRANSDIR)

## CAPITULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

## 6.1 - CONCLUSÕES

Neste trabalho foi discutido o problema do despacho econômico, procurando-se mostrar a importância de se considerar a análise da estabilidade transitória quando da obtenção da solução deste problema. Para isto foi formulado o problema do despacho econômico, de forma linearizada, permitindo-se que as mudanças de geração ficassem sempre menores que um percentual especificado. A solução deste problema linearizado fornece um despacho de geração pouco diferente do despacho inicial, em torno do qual o problema é novamente linearizado para uma próxima iteração.

Uma vez que os sistemas de potência são descritos por equações diferenciais não lineares, a existência de vários pontos de equilíbrio implica na necessidade de se considerar domínios de estabilidade, isto é, conjuntos de condições iniciais tais que as trajetórias que começam nestas condições iniciais evoluam para um ponto de equilíbrio pós-defeito.

As soluções do problema de despacho econômico considerando restrições de segurança estática não garantem que a condição de alcançabilidade do ponto de equilíbrio pós-defeito seja satisfeita quando ocorre uma contingência tipo perda de linha e/ou curto circuito seguido de perda de linha.

Neste sentido, utilizando-se resultados associados à metodologia SLEP (Superfície Limite de Energia Potencial) para melhoria da segurança, foi proposto no capítulo 4 um algoritmo para solução do problema de despacho econômico considerando ambos os aspectos de segurança, isto é, estático e dinâmico.

A consideração da segurança estática foi feita tomando-se limites máximos de fluxo nas linhas de transmissão e transformadores do sistema, associados a regime de operação normal e de emergência e considerando-se uma função custo associada à operação do sistema.

A segurança dinâmica foi levada em conta através da análise da estabilidade transitória cada vez que se obtém um despacho para o sistema que minimize a função objetivo do problema de despacho econômico. Para a melhoria da segurança foi feito uso de um algoritmo que fornece um vetor chamado vetor  $s$ , que pode ser usado na indicação de mudanças visando melhoria da segurança.

O uso destas propriedades permitiu, então, a formulação do problema mostrado no capítulo 4, onde se considera uma função objetivo composta pela soma do vetor  $s$  e o vetor de coeficientes da função custo.

Este problema foi resolvido no capítulo 5 usando-se o algoritmo proposto no capítulo 4, onde se mostrou inicialmente a necessidade de se considerar a estabilidade transitória no problema de despacho econômico.

Através da análise dos resultados do(s) exemplo(s) apresentados no capítulo 5, conclui-se que:

1) Definir o plano de geração do ponto de vista só econômico (exemplo 2.a), não garante a segurança do sistema face a perturbações severas tipo curto-circuito seguido de perda de linha (para eliminação do defeito), uma vez que as condições que definem mínimo custo de operação (preço de combustível, nível dos reservatórios de água, etc.) são desconexas das características físicas do sistema (parâmetros de linhas, transformadores e geradores, etc.).

2) As medidas corretivas na direção de melhorar só a segurança do sistema (exemplo 2.b) elevam, em geral, o custo de geração do sistema.

3) Os resultados do redespacho econômico-segurança (exemplo 2.c), proporcionam um ponto de operação com custo mais econômico que considerando somente segurança e mais elevado que considerando só o critério econômico.

Destaca-se também que o nível de segurança obtido é de ordem semelhante ao caso em que se melhora apenas a segurança dinâmica.

É observado então que melhoria da segurança dinâmica em geral acarreta um afastamento do ponto de operação de seu ponto ótimo com mínimo custo, sacrificando com isto o grau de otimalidade da solução em troca do ganho de segurança do sistema.

Os critérios de parada que podem ser utilizados podem levar em conta o custo considerando-se uma margem menor que uma margem mínima ou um nível máximo de margem, sem considerações de custo, entre outras. A escolha deverá ser feita tendo-se em vista o uso a ser feita dos resultados.

Nos resultados obtidos foi observada uma relação entre o nível de perdas e a margem de segurança do sistema e vice-versa. Esta relação sugeriu o uso das informações contidas nas perdas do sistema como uma nova orientação para melhoria da segurança. Isto foi feito no capítulo 5 e os resultados preliminares obtidos animam investimentos no aprofundamento desta consideração, bem como na sua formalização, o que aliás esta sendo feito no DEL/UFSC.

Assim, considera-se que uma das principais aplicações da metodologia proposta, consiste na utilização de um procedimento, baseado no método SLEP, para análise e correção de pontos de operação de um sistema de potência, escolhidos de acordo com algum critério de otimalidade. Se este ponto não satisfaz à análise de segurança, incluída aqui a estabilidade transitória, o algoritmo propõe uma mudança do ponto de operação de modo que um nível mínimo de segurança seja atingido, o que implica, necessariamente um aumento do custo associado ao ponto de operação ótimo.

## 6.2 - SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

O algoritmo proposto neste trabalho apresentou bom desempenho

com relação à qualidade dos resultados e ao tempo de processamento , entretanto, acreditamos que algumas melhorias possam ser incorporadas em futuros trabalhos . Estas são :

- A utilização de técnicas de esparsidade , na solução do problema de programação linear, que se traduzirá em redução dos requisitos de memória.

- Utilizar o método simplex dual na forma revisada para resolver o problema de modo a evitar a busca demorada de uma solução viável inicial (fase 1) , pois a maior parte das iterações são realizadas nesta fase.

- Estudar a possibilidade de incluir no problema os limites de tensão como resultado da variação das potências ativas de geração.

- Estender o algoritmo para o despacho econômico multiárea e definir intercâmbio de potência ativa com critério econômico.

- Formalização do problema de obtenção de direção de melhoria de segurança baseada na formulação de perdas.

## CAPÍTULO 7

REFERÊNCIAS

- [1]- ELGERD, O.I. "Electric Energy Systems Theory : An Introduction", McGraw Hill, New York, 1971.
- [2]- MONTICELLI, A.J. "Fluxo de carga em redes de energia elétrica", Editora Edgard Blucher Ltda., São Paulo, S.P., 1983.
- [3]- PAI, M.A. "Power system stability. Analysis by direct method of Lyapunov". North-Holland Publishing Company. 1981, v3.
- [4]- LASDON, L.S. "Optimization theory for large systems". The McMillan Company, New York, 1972.
- [5]- HAPP, H.H. "Optimal power dispatch - A comprehensive survey". IEEE Trans. PAS., May/June 1977, PP. 841-854.
- [6]- STOTT, B., MARINHO, J.L. "Linear programming for power system network security applications", IEEE Trans. PAS., May/June 1979, pp.837-848.
- [7]- PODMORE, R. "Economic power dispatch with line security limits". IEEE Trans. PAS., Jan/Feb. 1974, pp. 289-295.
- [8]- STOTT, B., HOBSON, E. "Power system security control calculations using linear programming", Part I e II. IEEE Trans. PAS., Sept/Oct. 1978. pp.1713-1720 e 1721-1731.
- [9]- FARGHAL, S.A. "Fast technique for power system security assessment using sensitivity parameters of linear programming". IEEE Trans. PAS., may 1984, pp. 946-953.
- [10]- LUGTHU, R. "Security constrained dispatch", IEEE Trans. PAS., Jan/Feb. 1979. pp. 270-274.
- [11]- AOKI, K. "Economic dispatch with network security constraints using parametric quadratic programming". IEEE Trans. PAS., december 1982.

pp. 4548 - 4554.

- [12]- LI WENYUAN "An on-line economic power dispatch method with security",  
Electric Power Systems Research, 9, 1985, pp. 173-181.
- [13]- AOKI, K., SATOH, T. "New Algorithms for Classic Economic Load  
Dispatch", IEEE Trans. PAS., June 1984, pp. 1423-1430.
- [14]- PEREIRA, M.V.F., PINTO, L.M.V.G. "A decomposition approach to the  
economic dispatch of hydrothermal systems". IEEE Trans. PAS.,  
October 1982. pp. 3851-3860.
- [15]- ROMANO, QUINTANA "Constrained economic dispatch of multi area systems  
using the Dantzing- Wolfe decomposition principle". IEEE Trans. PAS.  
April 1981. pp. 2127-2133
- [16]- PEREIRA, M.V.F., MONTICELLI, A., PINTO, L.M.V.G. "Security-Constrained  
Dispatch with corrective rescheduling", IFAC Symposium on planning  
and operation of Electric Energy Systems, Rio de Janeiro, Brasil.  
July 1985. pp. 387-394.
- [17]- LI WENYUAN "A successive linear programming model for real-time  
economic power dispatch with security". Electric Power Systems  
Research, No.13, 1987, pp. 225 - 233.
- [18]- FONSECA, L.G.S & DECKER, I. C. "Análise de estabilidade transitória em  
sistemas de potência pela monitoração das trajetórias aproximadas  
após perturbação". V CBA, I Congr. Latino Americ. automatica,  
Campina Grande, 1984, pp. 581-586.
- [19]- ATHAY, T., SHERKEY, V.R., PODMORE, R., VIRMANI, S., PUECH, C.  
"Transient energy stability analysis. Conference on System  
Engineering for Power: Emergency Operating State Control"- Section  
IV, Davos, Switzerland 1979 .
- [20]- FONSECA, L.G.S, DECKER, I.C., PEDROSO, A.S. "Estudo comparativo de

avaliação de estabilidade transitória". III Encontro Regional Latinoamericano da CIGRE . Foz do Iguaçu, maio 1989.

- [21]- TAVORA, C.J. SMITH, O.J.M. "Characterization of equilibrium and stability in power systems". IEEE Trans. PAS. May/June 1972. pp. 1127-1130.
- [22]- FONSECA, L.G.S., PEDROSO A.S. "Correção da segurança dinâmica em sistemas de potência de grande porte via redespacho" .A ser apresentado no VIII Congresso Brasileiro de Automática. Belém do Pará, setembro de 1990.
- [23]- FONSECA, L.G.S. MINUSSI, C.R. "Correção da segurança de sistemas de energia elétrica considerando faltas tipo curto circuito". VIII CONGRESO CHILENO DE INGENIERIA ELETRICA. Oct./1989.
- [24]- YAMASHIRO, S. "On-line Secure-Economy Preventive Control of Power systems by pattern recognition", IEEE Trans. PAS, August 1986, pp. 214-219.
- [25]- CHANDRASHEKHAR, K.S., HILL, D.J. "Dynamic security dispatch : Basic formulation". IEEE Trans. PAS., July 1983, pp. 2145 - 2154.
- [26]- FONSECA, L.G.S., SAVI, T.C.O., MOROZOWSKI, M. "Redespacho de geração visando melhoria de segurança". IV CBA, Campinas - SP, Brasil, pp. 502 - 507.
- [27]- SAVI, T.C.O. "Um algoritmo para melhoria de segurança em problemas de despacho econômico ". Tese de Mestrado UFSC. Florianópolis, 1981.
- [28]- DECKER, I.C. "Análise de estabilidade transitória em sistemas de potência usando o conceito de superfície limite de energia potencial". Tese de Mestrado UFSC. Florianópolis 1984.
- [29]- AGUILAR, A.H.G. "Despacho de geração para o controle em tempo real dos sistemas de potência". Tese de Mestrado UFSC. Florianópolis, 1986.



- [30]- CARPENTIER, J.L. "Optimal power flows: Uses, methods and developments," IFAC Electric Energy Systems, RJ, Brasil, 1985. pp. 11-21.
- [31]- STOTT, B., ONGUN, A., MONTICELLI, A.J. "Security Analysis and Optimization," PROC. OF THE IEEE VOL. 75, No.12, DEC. 1987. pp.1623-1644.
- [32]- KIRSCHEN, D.S. VAN MEETEREN, H.P. "MW/Voltage control in a linear programming based optimal power flow," IEEE Trans. PAS, MAY 1988. pp. 481-489.
- [33]- FROMM, G. CHAMORRO, R. RUDNICK, H. RIOS, S. "Evaluation of transmission losses and penalty factors for marginal cost pricing". IFAC Electric Energy Systems, RJ, Brasil. 1985.
- [34]- FONSECA, L.G.S. "Domínios de estabilidade para uso em planejamento e operação de sistemas de potência". Tese de D.Sc. COPPE/UFRJ, Abril/1976.

## ANEXO A

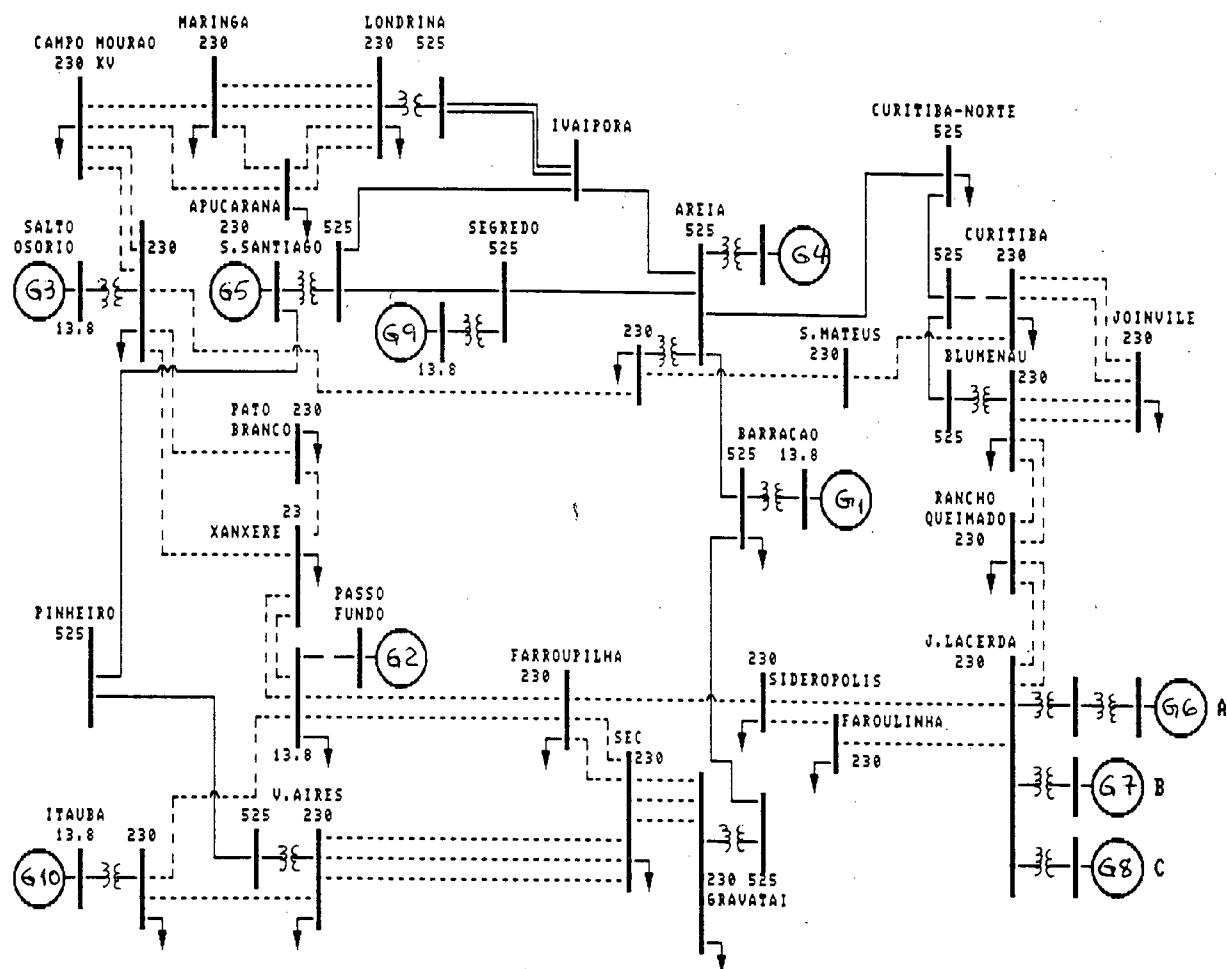


FIGURA A.1- Diagrama unifilar do sistema baseado na configuração da região sul do Brasil - Sistema de 10 máquinas.

TABELA A.1 - Dados do sistema de transmissão (Sistema teste de 10 máquinas).

BARRA ORIGEM		BARRA DESTINO		IMPEDÂNCIA		SHUNT
No.	NOME	No.	NOME	R(%)	X(%)	MVA
343	IVAIPORA.525	344*	LONDRINA.525	0.070	1.450	166.100
343	IVAIPORA.525	344*	LONDRINA.525	0.070	1.450	166.100
343*	IVAIPORA.525	382	AREIA.525	0.180	2.270	227.210
343*	IVAIPORA.525	391	S. SANTIAG525	0.140	2.040	244.750
344*	LONDRINA.525	343	IVAIPORA.525	0.070	1.450	166.100
344*	LONDRINA.525	343	IVAIPORA.525	0.070	1.450	166.100
344	LONDRINA.525	431*	LONDRINA.230	0.0	0.630	0.0
366*	BARRACAO13.8	386	BARRACAO.525	0.0	1.360	0.0
367	SIDEROPOL230	368*	FARROUPIL230	3.860	19.850	34.000
367	SIDEROPOL230	396*	J. LACERDA230	0.960	4.910	8.420
367	SIDEROPOL230	437*	FORQUILHI230	0.330	1.670	28.590
368*	FARROUPIL230	367	SIDEROPOL230	3.860	19.850	34.000
368	FARROUPIL230	370*	P. FUNDO. 230	4.630	23.780	40.840
368	FARROUPIL230	370*	P. FUNDO. 230	4.630	23.780	40.840
368	FARROUPIL230	399*	CECI. 230	1.770	9.100	15.850
368	FARROUPIL230	399*	CECI. 230	1.770	9.100	15.850
368	FARROUPIL230	399*	CECI. 230	1.770	9.100	15.850
369*	P. FUNDO. 13.8	370	P. FUNDO. 230	0.0	4.600	0.0
370*	P. FUNDO. 230	368	FARROUPIL230	4.630	23.780	40.840
370*	P. FUNDO. 230	368	FARROUPIL230	4.630	23.780	40.840
370	P. FUNDO. 230	369*	P. FUNDO. 13.8	0.0	4.600	0.0
370*	P. FUNDO. 230	371	XANXERE. 230	1.630	8.350	14.400
370*	P. FUNDO. 230	371	XANXERE. 230	1.630	8.350	14.400
370	P. FUNDO. 230	408*	ITAUBA. 230	2.500	15.480	46.900
371	XANXERE. 230	370*	P. FUNDO. 230	1.630	8.350	14.400
371	XANXERE. 230	370*	P. FUNDO. 230	1.630	8.350	14.400
371	XANXERE. 230	372*	P. BRANCO. 230	1.630	8.350	14.400
371	XANXERE. 230	374*	S. OSORIO. 230	3.160	16.210	27.840
372*	P. BRANCO. 230	371	XANXERE. 230	1.630	8.350	14.400
372	P. BRANCO. 230	374*	S. OSORIO. 230	1.530	8.610	13.440
373*	S. OSORIO13.8	374	S. OSORIO. 230	0.0	1.140	0.0
374*	S. OSORIO. 230	371	XANXERE. 230	3.160	16.210	27.840
374*	S. OSORIO. 230	372	P. BRANCO. 230	1.530	8.610	13.440

TABELA A.1 - Continuação

BARRA ORIGEM		BARRA DESTINO		IMPEDÂNCIA		SHUNT
No.	NOME	No.	NOME	R(%)	X(%)	MVA
374	S. OSORIO. 230	373*	S. OSORIO13.8	0.0	1.140	0.0
374	S. OSORIO. 230	375*	AREIA. 230	3.060	15.230	27.020
374	S. OSORIO. 230	433*	C. MOURAO. 230	3.440	17.600	30.400
374	S. OSORIO. 230	433*	C. MOURAO. 230	3.440	17.600	30.400
375*	AREIA. 230	374	S. OSORIO. 230	3.060	15.230	27.020
375	AREIA. 230	376*	S. MATEUS. 230	2.450	12.560	20.410
375*	AREIA. 230	382	AREIA. 525	0.0	3.000	0.0
376*	S. MATEUS. 230	375	AREIA. 230	2.450	12.560	20.410
376	S. MATEUS. 230	377*	CURITIBA. 230	0.880	4.150	52.110
377*	CURITIBA. 230	376	S. MATEUS. 230	0.880	4.150	52.110
377	CURITIBA. 230	378*	JOINVILE. 230	1.820	9.350	15.950
377	CURITIBA. 230	378*	JOINVILE. 230	1.820	9.350	15.950
377	CURITIBA. 230	383*	CURITIBA. 525	0.0	0.620	0.0
378*	JOINVILE. 230	377	CURITIBA. 230	1.820	9.350	15.950
378*	JOINVILE. 230	377	CURITIBA. 230	1.820	9.350	15.950
378	JOINVILE. 230	379*	BLUMENAU. 230	1.540	7.760	13.500
378	JOINVILE. 230	379*	BLUMENAU. 230	1.540	7.760	13.500
379*	BLUMENAU. 230	378	JOINVILE. 230	1.540	7.760	13.500
379*	BLUMENAU. 230	378	JOINVILE. 230	1.540	7.760	13.500
379	BLUMENAU. 230	380*	R. QUEIMAD230	2.160	11.050	18.630
379	BLUMENAU. 230	380*	R. QUEIMAD230	2.160	11.050	18.630
379	BLUMENAU. 230	385*	BLUMENAU. 525	0.0	0.620	0.0
380*	R. QUEIMAD230	379	BLUMENAU. 230	2.160	11.050	18.630
380*	R. QUEIMAD230	379	BLUMENAU. 230	2.160	11.050	18.630
380	R. QUEIMAD230	396*	J. LACERDA230	1.800	9.200	15.530
380	R. QUEIMAD230	396*	J. LACERDA230	1.800	9.200	15.530
381*	F. AREIA. 13.8	382	AREIA. 525	0.0	0.670	0.0
382	AREIA. 525	343*	IVAIPORA. 525	0.180	2.270	227.210
382	AREIA. 525	375*	AREIA. 230	0.0	3.000	0.0
382	AREIA. 525	381*	F. AREIA. 13.8	0.0	0.670	0.0
382	AREIA. 525	383*	CURITIBA. 525	0.190	2.800	335.760
382	AREIA. 525	384*	CUR. NORTE525	0.190	2.740	328.670
382*	AREIA. 525	386	BARRACAO. 525	0.140	1.950	239.680

TABELA A.1 - Continuação

BARRA ORIGEM		BARRA DESTINO		IMPEDÂNCIA		SHUNT
No.	NOME	No.	NOME	R(%)	X(%)	MVA
382	AREIA.525	398*	SEGREDO.525	0.050	0.700	83.920
383*	CURITIBA.525	377	CURITIBA.230	0.0	0.620	0.0
383*	CURITIBA.525	382	AREIA.525	0.190	2.800	335.760
383	CURITIBA.525	384*	CUR.NORTE525	0.050	0.690	82.160
383	CURITIBA.525	385*	BLUMENAU.525	0.120	1.750	209.700
384*	CUR.NORTE525	382	AREIA.525	0.190	2.740	328.670
384*	CUR.NORTE525	383	CURITIBA.525	0.050	0.690	82.160
385*	BLUMENAU.525	379	BLUMENAU.230	0.0	0.620	0.0
385*	BLUMENAU.525	383	CURITIBA.525	0.120	1.750	209.700
386	BARRACAO.525	366*	BARRACAO13.8	0.0	1.360	0.0
386	BARRACAO.525	382*	AREIA.525	0.140	1.950	239.680
386	BARRACAO.525	387*	GRAVATAI.525	0.210	3.090	371.830
387*	GRAVATAI.525	386	BARRACAO.525	0.210	3.090	371.830
387*	GRAVATAI.525	402	GRAVATAI.230	0.0	0.620	0.0
388	V.AIRES.525	389*	PINHEIRO.525	0.220	3.000	383.000
388*	V.AIRES.525	414	V.AIRES.230	0.0	0.620	0.0
389*	PINHEIRO.525	388	V.AIRES.525	0.220	3.000	383.000
389	PINHEIRO.525	391*	S.SANTIAG525	0.140	1.950	239.700
390*	S.SANTIA13.8	391	S.SANTIAG525	0.0	1.140	0.0
391	S.SANTIAG525	343*	IVAIPORA.525	0.140	2.040	244.750
391*	S.SANTIAG525	389	PINHEIRO.525	0.140	1.950	239.700
391	S.SANTIAG525	390*	S.SANTIA13.8	0.0	1.140	0.0
391	S.SANTIAG525	398*	SEGREDO.525	0.050	0.700	83.920
392*	J.LAC.A.13.8	393	J.LACERDA138	0.0	8.710	0.0
393	J.LACERDA138	392*	J.LAC.A.13.8	0.0	8.710	0.0
393	J.LACERDA138	396*	J.LACERDA230	0.0	5.900	0.0
394*	J.LAC.B.13.8	396	J.LACERDA230	0.0	7.010	0.0
395*	J.LAC.C.13.8	396	J.LACERDA230	0.0	4.500	0.0
396*	J.LACERDA230	367	SIDEROPOL230	0.960	4.910	8.420
396*	J.LACERDA230	380	R.QUEIMAD230	1.800	9.200	15.530
396*	J.LACERDA230	380	R.QUEIMAD230	1.800	9.200	15.530
396*	J.LACERDA230	393	J.LACERDA138	0.0	5.900	0.0
396	J.LACERDA230	394*	J.LAC.B.13.8	0.0	7.010	0.0
396	J.LACERDA230	395*	J.LAC.C.13.8	0.0	4.500	0.0

TABELA A.1 - Continuação

BARRA ORIGEM		BARRA DESTINO		IMPEDÂNCIA		SHUNT
No.	NOME	No.	NOME	R(%)	X(%)	MVA
396	J. LACERDA230	437*	FORQUILHI230	1.290	6.570	11.280
397*	SEGredo. 13.8	398	SEGredo. 525	0.0	0.680	0.0
398*	SEGredo. 525	382	AREIA. 525	0.050	0.700	83.920
398*	SEGredo. 525	391	S. SANTIAGO525	0.050	0.700	83.920
398	SEGredo. 525	397*	SEGredo. 13.8	0.0	0.680	0.0
399*	CECI. 230	368	FARROUPIL230	1.770	9.100	15.850
399*	CECI. 230	368	FARROUPIL230	1.770	9.100	15.850
399*	CECI. 230	368	FARROUPIL230	1.770	9.100	15.850
399	CECI. 230	402*	GRAVATAI. 230	0.220	1.110	2.320
399	CECI. 230	402*	GRAVATAI. 230	0.220	1.110	2.320
399	CECI. 230	402*	GRAVATAI. 230	0.190	1.010	2.040
399	CECI. 230	414*	V. AIRES. 230	2.070	9.330	17.180
399	CECI. 230	414*	V. AIRES. 230	1.680	9.300	17.200
399	CECI. 230	414*	V. AIRES. 230	1.760	9.840	17.980
402	GRAVATAI. 230	387*	GRAVATAI. 525	0.0	0.620	0.0
402*	GRAVATAI. 230	399	CECI. 230	0.220	1.110	2.320
402*	GRAVATAI. 230	399	CECI. 230	0.220	1.110	2.320
402*	GRAVATAI. 230	399	CECI. 230	0.190	1.010	2.040
407*	ITAUBA. 13.8	408	ITAUBA. 230	0.0	2.360	0.0
408*	ITAUBA. 230	370	P. FUNDO. 230	2.500	15.480	46.900
408	ITAUBA. 230	407*	ITAUBA. 13.8	0.0	2.360	0.0
408	ITAUBA. 230	414*	V. AIRES. 230	2.020	11.290	20.620
414	V. AIRES. 230	388*	V. AIRES. 525	0.0	0.620	0.0
414*	V. AIRES. 230	399	CECI. 230	2.070	9.330	17.180
414*	V. AIRES. 230	399	CECI. 230	1.680	9.300	17.200
414*	V. AIRES. 230	399	CECI. 230	1.760	9.840	17.980
414*	V. AIRES. 230	408	ITAUBA. 230	2.020	11.290	20.620
430	APUCARANA230	431*	LONDRINA. 230	1.250	6.410	11.090
430	APUCARANA230	431*	LONDRINA. 230	0.890	4.610	7.960
430	APUCARANA230	432*	MARINGA. 230	1.100	11.840	20.270
430	APUCARANA230	433*	C. MOURAO. 230	2.290	11.740	20.270
431*	LONDRINA. 230	344	LONDRINA. 525	0.0	0.630	0.0
431*	LONDRINA. 230	430	APUCARANA230	1.250	6.410	11.090
431*	LONDRINA. 230	430	APUCARANA230	0.890	4.610	7.960
431	LONDRINA. 230	432*	MARINGA. 230	1.720	8.840	14.340

TABELA A.1 - Continuação

BARRA ORIGEM		BARRA DESTINO		IMPEDÂNCIA		SHUNT
No.	NOME	No.	NOME	R(%)	X(%)	MVA
431	LONDRINA.230	432*	MARINGA.230	1.720	8.840	14.340
432*	MARINGA.230	430	APUCARANA230	1.100	11.840	20.270
432*	MARINGA.230	431	LONDRINA.230	1.720	8.840	14.340
432*	MARINGA.230	431	LONDRINA.230	1.720	8.840	14.340
432	MARINGA.230	433*	C.MOURAO.230	1.810	9.290	16.070
433*	C.MOURAO.230	374	S.OSORIO.230	3.440	17.600	30.400
433*	C.MOURAO.230	374	S.OSORIO.230	3.440	17.600	30.400
433*	C.MOURAO.230	430	APUCARANA230	2.290	11.740	20.270
433*	C.MOURAO.230	432	MARINGA.230	1.810	9.290	16.070
437*	FORQUILHI230	367	SIDEROPOL230	0.330	1.670	28.590
437*	FORQUILHI230	396	J.LACERDA230	1.290	6.570	11.280

TABELA A.2 - Dados de barras(Sistema teste de 10 máquinas).

IDENTIFICAÇÃO		TENSÃO		CARGA		GERAÇÃO	
No.	NOME	MÓD.	ÂNGULO	MW	MVAR	MW	MVAR
343	IVAIPORA.525	1.034	-10.87	0.0	0.0	0.0	0.0
344	LONDRINA.525	1.024	-13.11	0.0	0.0	0.0	0.0
366	BARRACAO13.8	1.020	-10.98	0.0	0.0	650.00	-30.14
367	SIDEROPOL230	0.967	-36.58	177.00	68.00	0.0	0.0
368	FARROUPIL230	1.020	-36.27	191.00	42.00	0.0	0.0
369	P.FUNDO.13.8	1.040	-16.84	0.0	0.0	215.00	66.23
370	P.FUNDO.230	1.015	-22.21	171.00	18.50	0.0	0.0
371	XANXERE.230	0.987	-17.72	126.00	47.00	0.0	0.0
372	P.BRANCO.230	0.986	-10.81	46.00	14.70	0.0	0.0
373	S.OSORIO13.8	1.020	5.10	0.0	0.0	1050.00	149.02
374	S.OSORIO.230	1.010	-1.57	281.00	56.50	0.0	0.0
375	AREIA.230	0.998	-14.94	279.00	60.70	0.0	0.0
376	S.MATEUS.230	0.973	-25.73	130.00	29.40	0.0	0.0
377	CURITIBA.230	0.979	-26.08	427.00	-25.00	0.0	0.0
378	JOINVILE.230	0.923	-32.96	310.00	141.00	0.0	0.0
379	BLUMENAU.230	0.958	-31.56	424.00	90.60	0.0	0.0
380	R.QUEIMAD230	0.967	-33.69	117.00	53.10	0.0	0.0

TABELA A.2 - Continuação.

IDENTIFICAÇÃO		TENSÃO		CARGA		GERAÇÃO	
No.	NOME	MÓD.	ÂNGULO	MW	MVAR	MW	MVAR
382	AREIA.525	1.025	-10.24	0.0	0.0	0.0	0.0
381	F.AREIA.13.8	1.022	-6.17	0.0	0.0	1110.00	-13.62
383	CURITIBA.525	0.982	-23.63	0.0	0.0	0.0	0.0
384	CUR.NORTE525	0.984	-22.05	368.00	69.60	0.0	0.0
385	BLUMENAU.525	0.965	-29.44	0.0	0.0	0.0	0.0
386	BARRACAO.525	1.028	-15.81	174.00	-8.20	0.0	0.0
387	GRAVATAI.525	1.032	-32.60	0.0	0.0	0.0	0.0
388	V.AIRES.525	1.034	-25.93	0.0	0.0	0.0	0.0
389	PINHEIRO.525	1.037	-13.34	0.0	0.0	0.0	0.0
390	S.SANTIA13.8	1.018	3.19	0.0	0.0	1325.00	-46.69
391	S.SANTIAG525	1.034	-5.06	0.0	0.0	0.0	0.0
392	J.LAC.A.13.8	1.030	-29.14	0.0	0.0	90.00	44.68
393	J.LACERDA138	0.995	-33.53	126.00	39.80	0.0	0.0
394	J.LAC.B.13.8	1.030	-27.61	0.0	0.0	120.00	52.86
395	J.LAC.C.13.8	1.030	-26.24	0.0	0.0	241.00	87.43
396	J.LACERDA230	0.997	-32.30	0.0	0.0	0.0	0.0
397	SEGREDO.13.8	1.020	0.0	0.0	0.0	1358.00	-57.81
398	SEGREDO.525	1.028	-5.05	0.0	0.0	0.0	0.0
399	CECI.230	1.035	-36.43	813.00	110.00	0.0	0.0
402	GRAVATAI.230	1.044	-35.82	612.00	-455.00	0.0	0.0
407	ITAUBA.13.8	1.000	-15.48	0.0	0.0	490.00	85.62
408	ITAUBA.230	0.987	-22.21	404.00	135.00	0.0	0.0
414	V.AIRES.230	1.040	-28.47	393.00	-111.00	0.0	0.0
430	APUCARANA230	0.990	-18.33	262.00	13.20	0.0	0.0
431	LONDRINA.230	1.009	-15.11	229.00	183.00	0.0	0.0
432	MARINGA.230	0.978	-18.17	184.00	60.20	0.0	0.0
433	C.MOURAO.230	0.971	-14.66	139.00	53.70	0.0	0.0
437	FORQUILHI230	0.965	-36.37	90.10	55.30	0.0	0.0



TABELA A.3 - Dados das máquinas (Sistema de 10 máquinas).

No. MÁQUINA	REATÂNCIA X'd (%)	CONST. INÉRCIA H (s)
366	3,67	30,44
369	10,37	10,56
373	2,84	38,34
381	2,41	62,25
390	2,43	55,24
392	13,52	4,37
394	15,34	6,80
395	8,00	12,50
397	2,16	62,46
407	4,32	20,24

TABELA A.4 - Coeficientes do custo incremental de geração

A derivada da função custo de geração da máquina  $i$ , dá a expressão do custo incremental, dado por:

$$df_i/dPG_i = 2c_i PG_i + b_i$$

BARRA	$c_i$	$b_i$
366	0.0015	15.0
369	0.0002	2.0
373	0.0001	1.0
381	0.0019	19.0
390	0.0025	25.0
392	0.0025	25.0
394	0.0025	25.0
395	0.0025	25.0
397	0.0018	18.0
407	0.0003	3.0

## ANEXO B

POLITOPO L

No capítulo 3 a modelagem do sistema elétrico foi feita respeitando a topologia da rede. Neste anexo, supõe-se a rede elétrica reduzida as barras internas de geração e representada pela sua matriz admitância de barra. O politopo L será também apresentado com relação ao centro de ângulos e mostrada como é definida a direção s para melhoria da segurança.

A potência injetada pelo i-ésimo gerador  $Pg_i$ , e que aparece no sistema de equações (3.2.1), e também em (B.7) considerando a rede reduzida à barras internas de geração é

$$Pg_i = |E_i|^2 G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_i E_j Y_{ij} \cos(\phi_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (B.1)$$

onde:

$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$  = matriz admitância de barra reduzida as barras internas de geração.

$E_i$  = módulo de tensão atrás da reatância transitória.

$\phi_{ij}$  = argumento do i,j-ésimo elemento da matriz Y

n = número de máquinas Ng

Se as condutâncias de transferência  $G_{ij}$  são desconsideradas

$$Pg_i = |E_i|^2 G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_i E_j B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (B.2)$$

### B.1 RELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS $\theta$ e $\alpha$

Os ângulos  $\theta$  são obtidos tomando como referência o centro de ângulos  $\delta_0$  [21].

$$\theta_i = \delta_i - \delta_0 \quad \text{para } i=1,2, \dots, n-1 \quad (\text{B.3})$$

Se o ângulo  $\delta_n$  do n-ésimo gerador é escolhido como referência, tem-se os ângulos  $\alpha$

$$\alpha_i = \delta_i - \delta_n \quad \text{para } i=1,2, \dots, n-1 \quad (\text{B.4})$$

Da definição dos ângulos  $\theta$ , substitue-se os ângulos  $\delta$  em (B.4)

$$\begin{aligned} \alpha_i &= \theta_i - \delta_0 - (\theta_n - \delta_0) \\ \alpha_i &= \theta_i - \theta_n \end{aligned} \quad (\text{B.5})$$

Assim, pode-se escrever

$$\alpha_i - \alpha_j = \theta_i - \theta_j = \delta_i - \delta_j \quad (\text{B.6})$$

No sistema (3.2.8) o ângulo do n-ésimo gerador pode ser escrito de forma explícita em função do centro de ângulo, assim

$$\begin{aligned} M_1 \omega_1 &= P_{m_1} - P_{g_1} - \frac{M_1}{M_T} PCA \\ \theta_n &= - \frac{1}{M_n} \sum_{i=1}^n M_i \theta_i \end{aligned} \quad (\text{B.7})$$

substituindo a (B.7) em (B.5), obtém-se

$$\alpha_i = \theta_i + \frac{1}{M_n} \sum_{i=1}^{n-1} M_i \theta_i \quad (\text{B.8})$$

De (B.8) pode-se definir a matriz G que relaciona  $\alpha$  e  $\theta$

$$G = I_{n-1} + \frac{1}{M_n} b b^T M_d \quad (\text{B.9})$$

onde:  $I_{n-1}$  = matriz identidade de ordem (n-1)

$$b = [1 \dots 1]^T$$

$$M_d = \text{diag} [M_i] \quad , i=1,2,\dots,n-1$$

A matriz G é de ordem (n-1), não singular e tem inversa [21], dada por

$$G^{-1} = I_{n-1} - \frac{1}{M_T} b b^T M_d \quad (\text{B.10})$$

onde:

$$M_T = \sum_{i=1}^{n-1} M_i$$

Assim (B.8) na forma matricial

$$\alpha = G \theta \quad (\text{B.11})$$

e também

$$\theta = G^{-1} \alpha \quad (\text{B.12})$$

substituindo (B.10) em (B.12) obtém-se

$$\theta_i = \alpha_i + \frac{1}{M_T} \sum_{j=1}^{n-1} M_j \alpha_j \quad (\text{B.13})$$

## B.2 FUNÇÃO ENERGIA

A função energia para o sistema (B,7), tomando-se a n-ésima máquina de referência, pode ser escrita [23,26,27]

$$E(\alpha, \alpha) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \dot{\alpha}_i^2 + E_p \quad (B.14)$$

A energia potencial  $E_p$  é

$$\begin{aligned} E_p = & \sum_{i=1}^{n-2} \sum_{j=i+1}^{n-1} F_{ij} [-\cos(z_{ij} + \alpha_{ij}^e) + \cos(\alpha_{ij}^e) - z_{ij} \sin(\alpha_{ij}^e)] + \\ & + \sum_{i=1}^{n-1} F_{in} [-\cos(z_i + \alpha_i^e) + \cos(\alpha_i^e) - z_i \sin(\alpha_i^e)] \quad (B.15) \end{aligned}$$

onde:

$$F_{ij} = E_i E_j B_{ij}$$

$\alpha^e$  = ponto de equilíbrio assintoticamente estável de (3.2.1)

$$z_i = \alpha_i - \alpha_i^e \quad (\text{translada } \alpha_i^e \text{ ao origem})$$

$$z_{ij} = z_i - z_j$$

$$z_{ij}^e = \alpha_i^e - \alpha_j^e$$

Em [26,27] mostra-se que a energia potencial do sistema pode ser decomposta em parcelas positivas da forma

$$\begin{aligned} E_p &= \sum_{k=1}^{n-1} g_k \\ g_k &= F_{ij} [-\cos(z_{ij} + \alpha_{ij}^e) + \cos(\alpha_{ij}^e) - z_{ij} \sin(\alpha_{ij}^e)] \quad (B.16) \end{aligned}$$

As parcelas  $g_k$  são chamadas de limites inferiores da energia potencial, associadas a ligação i-j do sistema de transmissão. Elas estão intrinsecamente

ligadas à capacidade elétrica da ligação entre as barras  $i$  e  $j$  e ao nível de operação do sistema elétrico em função dos ângulos de equilíbrio.

A função energia potencial é definida positiva e radialmente crescente na região definida pelo politopo  $L$  [34].

$$L = \{ z \mid (-\pi - 2\alpha_k^e) \leq z_k \leq (\pi - 2\alpha_k^e) \} \quad k=1,2,\dots,n-1 \quad (B.17)$$

### B.3 DOMÍNIO DE ESTABILIDADE

O domínio de estabilidade para o ponto de operação pós-defeito, pode ser resolvido através da solução do problema de otimização pelo método de Newton-Raphson.

$$\min E_p(p, F, z)$$

s.a.

$$z \in \delta L \text{ (fronteira do politopo } L)$$

Este domínio será especificado pela face onde ocorre a tangencia com uma superfície de nível da energia potencial. A busca da fase de tangência é orientada através da utilização do limite inferior, parcela da energia potencial que se mantém constante em toda a face, como apontador, considerando que as faces de maiores limites inferiores tem mais alta probabilidade de conter a tangência.

### B.3 DIREÇÃO PARA MELHORIA DA SEGURANÇA

Sendo que o sistema elétrico é reduzido as barras internas de geração, modificações no despacho de geração para diminuir o fluxo no ramo  $i$ - $j$ , o que é equivalente a afastar a fase correspondente do politopo, uma vez

que  $(-\pi - 2\alpha_k^e)$  e  $(\pi - 2\alpha_k^e)$  se afastam da origem. Então deslocar o ponto de operação em uma direção conveniente, tem como resultado um afastamento da face onde se deu a tangência, e assim obtém-se um aumento do domínio de estabilidade, como é mostrado na figura B.1

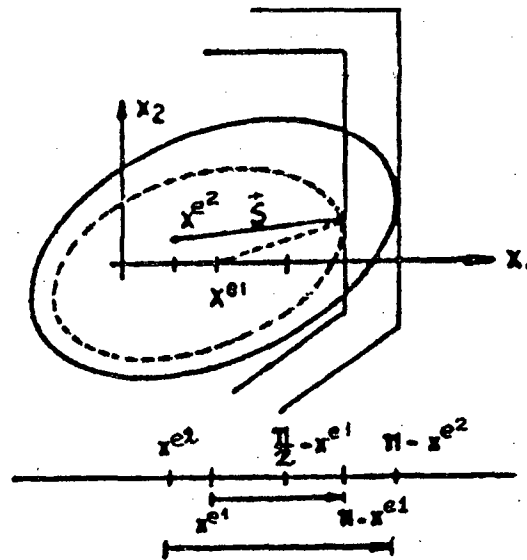


Figura B.1 Vetor  $s$

Usando-se o ponto de tangência como referência para o aumento do domínio de estabilidade do sistema sob defeito, uma direção viável para modificação do despacho pode ser definida

$$s = \alpha^t - \alpha^e \quad (\text{B.17})$$

onde o superescrito  $(^t)$  indica o ponto de tangência.

Usando (B.11) e (B.12), esta direção  $s$  pode ser definida com referência ao centro de ângulos.

$$s = C^{-1}(\alpha^t - \alpha^e) = \theta^t - \theta^e \quad (\text{B.18})$$



O politopo L, referido ao centro de ângulos constitui uma aproximação da SLEP (Superfície Limite de Energia Potencial) quando as condutâncias de linha são desprezadas e esta contido no interior da região definida por esta superfície. A SLEP por definição é o conjunto de pontos máximos que primeiro são alcançados ao longo de raios emanados da origem, mas a fronteira L é alcançada antes que a SLEP. Pontos da forma

$$q = \{\pm\pi - 2\alpha_1^e, \pm\pi - 2\alpha_2^e, \dots, \pm\pi - 2\alpha_k^e\} \quad (\text{B.19})$$

$$k = 1, 2, \dots, n-1$$

são pontos de máximo para a função energia potencial. Estes pontos pertencem ao politopo e à SLEP pois  $\nabla E_p = 0$  e, portanto  $\langle \nabla E_p, q \rangle = 0$ .